

Stephan Gehrke

**Geometrische und radiometrische Modellierung
der Mars-Oberfläche aus HRSC-Bilddaten**

München 2009

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 629

Geometrische und radiometrische Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Bilddaten

Von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Stephan Gehrke

aus Crivitz

D 83

München 2009

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283/ - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Referent: Prof. Dr. phil. nat. Jürgen Oberst, Technische Universität Berlin

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz, Technische Universität Berlin

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke, Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 22.12.2008

© 2009 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5041-9

Abstract

Image data from the *High Resolution Stereo Camera (HRSC)* on *Mars Express* is a significant contributor to scientific analysis of the Martian surface. HRSC covers the surface for the first time systematically in three dimensions: Within one *Mars Express* orbit five panchromatic and four color bands in stereo angles of up to 18.9° are recorded in a quasi-simultaneous manner. Such a data set allows for the derivation of Digital Terrain Models (DTMs) and, moreover, the modeling of directional dependence in reflectance, yielding conclusions on material properties.

The objective of this thesis is to utilize the full potential of the HRSC data by combining geometric and radiometric modeling of the Martian surface. The work is based upon Facets Stereo Vision, a powerful and flexible method for matching in object space. By integrating it with photoclinometry (shape-from-shading) and the derivation of reflectance parameters for both the Martian surface and its atmosphere, the method is extended towards a generalized modeling approach.

Matching makes use of geometric image information to provide absolute heights, while photoclinometry utilizes radiometric image information to determine relative height differences. This allows for areas of little or no image texture, in which matching is not sufficiently constrained, to be stabilized by photoclinometry – thereby predominantly enhancing topographic detail. In this context, local texture-dependent weighting between the two techniques is investigated to target photoclinometry where necessary and/or beneficial.

Photoclinometry is based on parameters of a surface reflectance model, which are generally constrained by matching and can be estimated along with the DTM. The most common radiometric parameterization of celestial bodies is Hapke's model. However, due its complexity it is substituted within the integrated adjustment by the empiric, phase-angle-dependent Lunar-Lambert model. Based on that proxy, Hapke parameters are derived in a subsequent processing step and then used to draw conclusions on material properties. To provide a reliable radiometric surface model, the influence of the atmosphere is accounted, i.e., the optical depth and the contribution of ambient light are derived from the HRSC data as well. Thus, an integrated approach for comprehensive modeling of the surface (and atmosphere) of Mars is presented, generating the optimal use of geometric and radiometric image contents of panchromatic HRSC bands of one *Mars Express* orbit. By means of theoretic investigations and practical examples, it is demonstrated how the approach's complexity can be adapted to individual properties of a specific area. A considerable contribution of this thesis lies in the analysis of HRSC observation constellations in combination with suitable radiometric parameterization.

The presented approach is applied to five areas on Mars that differ in size (between 2.8 km and 25.0 km), surface morphology, material properties, illumination and observation geometry, image texture, and ground resolution. Resulting DTMs demonstrate good accuracy in comparison to reference heights from *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)* and *HRSC DTM Test* results. Compared to the latter data, which have been collected using either image matching or photoclinometry, the advantage of combining both techniques is clearly visible, particularly for fine morphologic details. Co-determined Hapke reflectance and atmospheric parameters are plausible.

In conclusion, the integrated surface and atmospheric modeling can be carried out using solely HRSC imagery of a single orbit. Such a sophisticated approach, however, is sensitive to various factors and difficult to automate; the current MATLAB implementation is not operational. Against this background, potential enhancements and possibilities for future research are proposed.

Kurzfassung

Die Bilddaten der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) auf *Mars Express* leisten einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Analyse der Mars-Oberfläche. Mit der HRSC wird die Oberfläche erstmals systematisch dreidimensional erfasst: In einem Orbit werden fünf panchromatische und vier Farbkanäle in Stereowinkeln bis $18,9^\circ$ quasi-simultan aufgenommen. Damit bietet sich nicht nur die Möglichkeit, ein Digitales Geländemodell (DGM) abzuleiten, sondern auch Richtungsabhängigkeiten der Reflexion zu erfassen und so auf Materialeigenschaften rückzuschließen.

Ziel und Inhalt der vorliegenden Arbeit sind, das große Potential der HRSC-Daten möglichst vollständig auszunutzen und die geometrische und radiometrische Modellierung der Mars-Oberfläche zusammenzuführen. Dafür wird mit dem Facetten-Stereosehen ein flexibles, objektraumbasiertes Bildzuordnungsverfahren gewählt. Es wird um die Photoklinometrie (Shape-from-Shading) und die Ableitung von Reflexionsparametern der Oberfläche und Atmosphäre zu einem integrierten Auswerteansatz verallgemeinert.

In Bezug auf das DGM liefert die Bildzuordnung, basierend auf der geometrischen Bildinformation, absolute Höhen und die Photoklinometrie, basierend auf der radiometrischen Bildinformation, relative Höhenunterschiede. So werden texturarme Bereiche, in denen die Bildzuordnung nur schwach kontrolliert ist, stabilisiert und vor allem die Detailgenauigkeit gesteigert. In diesem Zusammenhang wird die lokale, texturabhängige Gewichtung zwischen beiden Verfahren untersucht, sodass die Photoklinometrie die Bildzuordnung gezielt ergänzt. Da Photoklinometrie ein Reflexionsmodell umfasst, können dessen Parameter bei der Integration mit Bildzuordnung mitbestimmt werden. Dazu wird das in der planetaren Photometrie verbreitete Hapke-Modell angesetzt, das aufgrund seiner Komplexität in der integrierten Ausgleichung selbst durch ein phasenwinkelabhängig formuliertes Lunar-Lambert-Modell approximiert wird. Die Hapke-Parameter werden anschließend bestimmt und ermöglichen den Rückschluss auf Materialeigenschaften. Mit dem Ziel der radiometrischen Oberflächenmodellierung werden die Bilddaten um den Einfluss der Mars-Atmosphäre korrigiert; die Berechnung der optischen Dichte und des Luftlichteinflusses ist ausschließlich aus HRSC-Daten möglich. Damit wird ein integrierter Ansatz zur vollständigen Modellierung der Mars-Oberfläche (und der Atmosphäre) basierend auf der vollständigen, geometrischen und radiometrischen Bildinformation der panchromatischen HRSC-Kanäle eines *Mars-Express*-Orbits präsentiert. Es werden sowohl theoretisch als auch anhand praktischer Beispiele Möglichkeiten aufgezeigt, wie dieser Ansatz in seiner Komplexität variiert und individuell an ein Bearbeitungsgebiet angepasst werden kann. Ein wesentlicher Beitrag der Arbeit ist die Analyse möglicher HRSC-Beobachtungskonstellationen und der entsprechend zweckmäßigen Parametrisierung des Hapke-Modells.

Der Auswerteansatz wird auf fünf Gebiete der Mars-Oberfläche angewendet, die sich hinsichtlich Größe (2,8 km bis 25,0 km), abgebildeter morphologischer Formen, Materialeigenschaften, Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie, Bildtextur und Datenauflösung unterscheiden. Die abgeleiteten DGMs sind in ihrer absoluten Höhen- und Detailgenauigkeit plausibel, wie Vergleiche mit Referenzhöhen des *Mars Orbiter Laser Altimeters* (MOLA) und mit den Ergebnissen des *HRSC DTM Tests* zeigen. Gegenüber letzteren, die entweder auf Bildzuordnung oder der Verfeinerung mittels Photoklinometrie basieren, zeigt sich der Vorteil der Integration beider Verfahren, vor allem in Bezug auf die Modellierung morphologischer Details. Die mitbestimmten Hapke-Parameter und Atmosphäreneigenschaften sind plausibel.

Die integrierte Oberflächen- und Atmosphärenmodellierung kann demnach ausschließlich aus den HRSC-Daten eines Orbits durchgeführt werden. Allerdings unterliegt diese Berechnung einer Vielzahl unterschiedlicher (Stör-)Einflüsse und ist kaum automatisierbar. Die aktuelle Implementierung in MATLAB ist nicht operationell. Vor diesem Hintergrund werden schließlich Möglichkeiten für zukünftige Erweiterungen und Stabilisierungen der Modellierung vorgeschlagen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Zielsetzung	8
1.3	Sachverwandte Arbeiten	9
1.4	Gliederung dieser Arbeit	10
2	Mars und seine Erforschung: HRSC auf Mars Express	11
2.1	Der Planet Mars	11
2.2	Das Kameraexperiment HRSC auf Mars Express	15
2.3	Das Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)	20
3	Radiometrische Grundlagen und Reflexionsmodelle	23
3.1	Nomenklatur	23
3.2	Vorgänge bei der Bildentstehung	24
3.3	Strahlungsphysikalische Größen	25
3.4	Reflexion	28
3.5	Parametrisierung von Oberflächen- und Materialeigenschaften	32
3.6	Planetare Reflexionsgesetze	40
4	Ansatz zur vollständigen Oberflächenbestimmung	44
4.1	Ausgleichsrechnung	46
4.2	Eingangsdaten für die Oberflächenmodellierung	47
4.3	Modelle zur Beschreibung natürlicher Oberflächen	47
4.4	Koordinatensysteme und Facettendefinition	50
4.5	Ableitung von Orthobildern	51
4.6	DGM-Berechnung auf Basis des Facetten-Stereosehens	55
4.7	Verknüpfung von Facetten-Stereosehen und Photoklinometrie	60
4.8	Integrierte geometrische und radiometrische Modellierung	63
4.9	Zusammenfassung des Modellierungsansatzes	67
4.10	Implementierung	69
5	Untersuchungen und Überlegungen zur Modellierung der Mars-Oberfläche	70
5.1	Vorfilterung der HRSC-Bilddaten	70
5.2	Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie	71
5.3	Reflexionsparameter: Bestimmbarkeit und Zusammenhänge	73
5.4	Empirische Reflexionsgesetze als Approximationen des Hapke-Modells	80
5.5	Bewertungskriterien und Vergleichsmöglichkeiten für die Ergebnisse	82

6 Ergebnisse der Anwendung auf HRSC-Daten	87
6.1 Die Bearbeitungsgebiete im Überblick	87
6.2 Einschlagkrater: Geometrische Modellierung	90
6.3 Talkomplex: Vergleich der Berechnungsverfahren	97
6.4 Kleine Krater: Herausforderung an die DGM-Berechnung	108
6.5 Bergland im Gusev-Krater: Bestimmung der Hapke-Parameter	115
6.6 Lavafluss: Beispiel einer radiometrischen Problemregion	121
6.7 Diskussion	123
7 Schlussbemerkungen	131
Abkürzungsverzeichnis	133
Quellenverzeichnis	135

1 Einleitung

Unser Nachbarplanet Mars steht gegenwärtig im besonderen Interesse der Planetenforschung. Derzeit (April 2009) arbeiten fünf Raumfahrtmissionen auf der Mars-Oberfläche oder im Orbit, darunter *Mars Express* mit der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC). Die Bilddaten dieses bislang einzigartigen Kameraexperiments eröffnen völlig neue Wege für die Erforschung des Mars. Sie ermöglichen etwa Aussagen über die Topographie und das Reflexionsverhalten seiner Oberfläche oder über die Atmosphäreneigenschaften. Traditionell werden dabei die Daten dem jeweiligen Forschungsinteresse folgend ausgewertet, der volle Informationsgehalt jedoch nicht ausgeschöpft. Um beispielsweise die Mars-Oberfläche möglichst vollständig zu beschreiben, liegt es nahe, die Komplexität der Bilddaten auch in einem entsprechend komplexen Auswerteansatz zu berücksichtigen.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der gemeinsamen geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche unter Ausnutzung der vollständigen geometrischen und radiometrischen Informationen der HRSC-Bilddaten.

1.1 Motivation

Das Erscheinungsbild der meisten Planeten, Monde, Asteroiden und anderer Himmelskörper wird durch ihre feste Oberfläche definiert. Charakteristische Formen und Albedomerkmale¹ bestimmen den Wiedererkennungswert und sind Auslöser für Spekulationen und Mythen, welche – wie gerade auch die Historie der Mars-Forschung zeigt – nicht selten die Hauptmotivation der Erforschung und wissenschaftlichen Auseinandersetzung sind.

Auf unserem Nachbarplaneten Mars gibt es Regionen, die seit der Noachischen Periode, also seit fast vier Milliarden Jahren, nahezu unverändert sind. Andererseits lassen aktuelle Erkenntnisse beispielsweise auf rezente vulkanische Aktivität schließen. Die heutige Form und Zusammensetzung der Mars-Oberfläche ist das Ergebnis verschiedener endogener Prozesse (Tektonik, Vulkanismus) und exogener Prozesse (Erosion und Sedimentation durch Wind, Wasser und Lava sowie Meteoriteneinschläge). Die Oberfläche hat diese Dynamik über einen langen Zeitraum „aufgezeichnet“. Im Umkehrschluss lässt die Erfassung und Modellierung der Oberflächeneigenschaften also Rückschlüsse auf die verursachenden Prozesse und damit auch auf die Entstehungsgeschichte und Entwicklung des gesamten Planeten Mars zu.

Die Methoden der Fernerkundung reichen von der erdgebundenen Beobachtung bis hin zu Raumfahrtmissionen, d.h. Beobachtungen aus dem Orbit und Landungen, die schließlich auch Experimente vor Ort ermöglichen. Von großer Bedeutung ist dabei die bildhafte Aufnahme im weitesten Sinn, also die räumlich und meist auch spektral aufgelöste Erfassung elektromagnetischer Strahlung durch aktive Systeme wie Laseraltimeter und passive Sensoren, die von der Oberfläche reflektierte oder ausgesandte Strahlung aufzeichnen. Letztere Abbildungen resultieren im sichtbaren Spektrum ausschließlich aus der Reflexion bzw. Streuung der Sonnenstrahlung. Die Reflexion ist abhängig von der Wellenlänge, der Strahlengeometrie (Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel in Bezug auf die lokalen Oberflächennormalen) sowie von den Materialeigenschaften und Oberflächenstrukturen. Eine vollständige Modellierung der Mars-Oberfläche aus Bilddaten sollte daher die Topographie, beispielsweise im Digitalen Geländemodell (DGM), und die spektralen Reflexionseigenschaften, welche wiederum auf materialbeschreibende Parameter

¹ Regionen, die sich in ihrem Reflexionsverhalten unterscheiden (*albedo features*)

zurückgehen, umfassen. Insbesondere die aussagekräftige radiometrische Beschreibung bedarf allerdings einer Reihe von Bilddaten desselben Gebietes, aufgenommen unter verschiedenen Beobachtungsgeometrien – ein Datensatz, der aufgrund der traditionellen Aufnahme von Einzelbildern in der Regel nicht vorliegt. In der Praxis existieren daher nur wenige Ansätze zur Verknüpfung der radiometrischen und geometrischen Modellierung. Die Berechnung von DGM und Reflexionseigenschaften erfolgt zumeist getrennt voneinander.

Die Situation ändert sich mit der systematischen Oberflächenaufnahme aus verschiedenen Beobachtungsrichtungen mit der HRSC an Bord der europäischen Raumfahrtmission *Mars Express*. Dieses Kameraexperiment kann die Oberfläche unseres Nachbarplaneten erstmals quasi-simultan dreidimensional erfassen. Innerhalb eines Orbits werden fünf panchromatische Kanäle und vier Farbkanäle in Stereowinkeln bis $18,9^\circ$ aufgenommen. Wenn sowohl die geometrischen als auch die radiometrischen Bildeigenschaften vollständig ausgenutzt werden, bietet sich nicht nur die Möglichkeit ein DGM abzuleiten, sondern darüber hinaus Richtungsabhängigkeiten in der Reflexion zu erfassen, die den Rückschluss auf Materialeigenschaften ermöglichen. Durch diese Verknüpfung von Photogrammetrie und Fernerkundung mit der Photometrie können HRSC-Daten – gemeinsam mit den Erkenntnissen aus anderen Experimenten – einen wesentlichen Beitrag zum tieferen Verständnis der Entstehung und Entwicklung des Mars, des erdähnlichsten Planeten unseres Sonnensystems, leisten.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Integration von geometrischer und radiometrischer Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Bilddaten, also die gemeinsame Ableitung von DGM und physikalisch interpretierbaren Reflexionseigenschaften. Dazu wird der photogrammetrische Ansatz des Facetten-Stereosehens nach WROBEL (1987a, 1987b) – bzw. die von EBNER et al. (1987) bzw. HELAVA (1988) praktisch gleichzeitig entwickelten, konzeptionell identischen Methoden – verwendet und maßgeblich erweitert. Das Verfahren ist objektorientiert, d.h. es erlaubt die direkte Ableitung der Objektmodelle aus Bilddaten und wird daher allgemein auch als Bildzuordnung (bzw. Matching) im Objektraum bezeichnet. Es ist flexibel im Hinblick auf Anpassungen und Ergänzungen wie die Modellierung richtungsabhängiger Reflexion. So können die Zusammenhänge zwischen Objektgeometrie und -radiometrie berücksichtigt werden.

Für diesen Zweck ist die systematische Aufnahme des Mars aus unterschiedlichen Blickwinkeln Grundvoraussetzung; allerdings stellen Bild- und Oberflächeneigenschaften auch besondere Herausforderungen an die Modellierung: Die Mars-Oberfläche verfügt über keine Vegetation oder künstlichen Objekte (von den in den HRSC-Daten nicht erkennbaren Überresten der wenigen Landungen einmal abgesehen). Im Auflösungsbereich von etwa 10-20 m wird ihr Erscheinungsbild weniger durch materialspezifische Farb- oder Helligkeitsunterschiede bestimmt als durch Schattierungen, die aus der Geländetopographie resultieren. So ergeben sich durchaus größere vergleichsweise homogene Bereiche in den aufgenommenen Bilddaten, was die Ableitung von Oberflächeneigenschaften zu einem schlecht gestellten Problem macht. In diesem Zusammenhang werden Möglichkeiten zur Regularisierung untersucht und diese vor allem optimal an die heterogenen Bildstrukturen angepasst.

Ein neuartiger, vielversprechender Ansatz ist die Verknüpfung des Facetten-Stereosehens mit der Photoklinometrie bzw. Shape-from-Shading. Die Bildzuordnung kann bei ausreichender Bildtextur zuverlässige absolute Höhen liefern, die Photoklinometrie Neigungen (Höhenänderungen) auf Basis der Bildradiometrie. Es liegt daher nahe, diese sich ergänzenden Verfahren zu kombinieren, wobei – vergleichbar zur Regularisierung – die bilddatenabhängige Gewichtung von entscheidender Bedeutung ist. Dass die Zuverlässigkeit der Photoklinometrie von der Qualität des radiometrischen Modells abhängt, unterstreicht noch einmal die Notwendigkeit einer möglichst vollständigen Oberflächenbeschreibung. Dazu wird das in der Planetenforschung gebräuchliche photometrische Gesetz von HAPKE (1981-2008) verwendet.

In diesem Zusammenhang muss auch der Atmosphäreneinfluss geeignet parametrisiert werden. Da der Fokus jedoch klar auf der Mars-Oberfläche liegt, wird eine zweckmäßige mathematische Formulierung gesucht, welche die Trennung zwischen Atmosphären- und Oberflächenreflexion ermöglicht. Der Versuch, auch die Atmosphäre detailliert zu modellieren, ginge über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

Insgesamt werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie aus den Bilddaten der HRSC auf *Mars Express* ein DGM und ein richtungsabhängiges Reflexionsmodell gemeinsam abgeleitet werden können. Von besonderer Bedeutung ist dabei die kritische Beurteilung der (Zwischen-)Ergebnisse, um die Modellierungen einander optimal anzupassen. Da auch die Berechnung von Orthobildern eingeschlossen ist, kann – für vergleichsweise kleine Gebiete der Mars-Oberfläche – ein umfassender Datensatz bereitgestellt werden, der verschiedenen Disziplinen als Grundlage ihrer weiterführenden Forschung dient.

1.3 Sachverwandte Arbeiten

Sämtliche von der HRSC aufgenommene Daten durchlaufen die systematische Prozessierung am *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR). Dabei werden DGMs und Orthobilder abgeleitet, die anschließend dem *HRSC Science Team* zur Verfügung stehen (SCHOLTEN et al. 2005, JAUMANN et al. 2007, GWINNER et al. 2007, 2008). Daneben gibt es andere, zum Teil experimentelle Ansätze zur photogrammetrischen Auswertung der Daten, die wie die systematische Verarbeitung auf Bildzuordnung oder auch auf Photoklinometrie basieren (DORRER et al. 2005, DUMKE et al. 2008, HIRSCHMÜLLER et al. 2006, GWINNER et al. 2005, KIRK et al. 2006, SCHMIDT 2008, SPIEGEL 2007a; Überblick in ALBERTZ et al. 2005 und HEIPKE et al. 2005). Sie wurden im Rahmen des *HRSC DTM Tests* von HEIPKE et al. (2006, 2007) verglichen. Zusätzlich zu der Erfahrung mit der Ableitung von DGMs aus HRSC-Daten bieten sich damit auch Vergleichsmöglichkeiten für die hier erzielten Ergebnisse. Auch die Untersuchungen hinsichtlich der Atmosphäre (z.B. HOEKZEMA 2009, HOEKZEMA et al. 2009) und der Bestimmung von Reflexionseigenschaften (PINET et al. 2005, 2006, JEHL et al. 2006, 2008) dienen der integrierten Modellbildung als Anhaltspunkte.

Das Reflexionsmodell von HAPKE (1981-2008) weist bis zu neun freie Parameter auf, für deren Bestimmung eine Reihe von verschiedenen Bestrahlungs- und Beobachtungswinkeln notwendig ist. Derartige Datensätze für den Mars gibt es vom *Hubble Space Teleskop* (SODERBLOM et al. 2006a), aus Messungen am Boden (z.B. SEELOS et al. 2005, JOHNSON et al. 2006, SODERBLOM et al. 2006b) und nunmehr auch von der HRSC, sodass Hapke-Parameter bezüglich sehr unterschiedlicher Lageauflösungen bestimmt wurden. Eine Vielzahl von Laborexperimenten (HAPKE & WELLS 1981, MCGUIRE & HAPKE 1995, CORD 2003, HELFENSTEIN & SHEPARD 2003, HAPKE et al. 2007, SHEPARD & HELFENSTEIN 2007, HAPKE 2008) und Simulationen (z.B. SHKURATOV et al. 2005, BARATOUX et al. 2006) sollen die Interpretation der aus realen Daten bestimmten Reflexionsparameter unterstützen, wobei auch das Modell selbst verfeinert wird. In Anbetracht der Komplexität ist der Beitrag von MCEWEN (1991) interessant, der Approximationsmöglichkeiten durch empirische Reflexionsmodelle aufzeigt, um beispielsweise die geometrische Objektmodellierung aus Bildern zu vereinfachen.

Während für diesen Zweck die klassische Bildzuordnung mit daran anschließender Objektrekonstruktion seit langem operationell eingesetzt wird, ist die Bildzuordnung im Objektraum als umfassender Auswerteansatz erst im Zuge der digitalen Photogrammetrie entwickelt worden (WROBEL 1987a, EBNER et al. 1987, HELAVA 1988, HEIPKE 1990, WEISENSEE 1992, WIMAN 1998) und dessen Potential noch nicht ausgeschöpft. Erste Anwendungen des Facetten-Stereosehens auf HRSC-Daten der Mars-Oberfläche von GEHRKE & HAASE (2006a, 2006b), BISCHOFF (2007), HAASE (2007) und GEHRKE (2007, 2008) führten bereits zu plausiblen DGMs und Orthobildern.

Die Anfänge der Photoklinometrie, welche in der Computer Vision bzw. auch allgemein als Shape-from-Shading bezeichnet wird, beschäftigten sich mit der Ableitung von Höhenprofilen. Zweidimensionale Verfahren, die auf der Auswertung eines Bildes beruhen, wurden beispielsweise von KIRK (1987), KIRK et

al. (2003) und, in Bezug auf HRSC-Daten, von DORRER et al. (2005) untersucht. Einen Überblick geben ZHANG et al. (1999) sowie PICHULLEK (2000) und LOHSE et al. (2006), die darauf aufbauend zugleich die gemeinsame Auswertung mehrerer Bilder vorschlagen (Mehrbild-Shape-from-Shading, *Multi Image Shape-from-Shading*; vgl. auch WROBEL 1989, HEIPKE 1992, GASKELL 2007). Daneben gibt es in der Computer Vision (FUA & LECLERC 1995, SAMARAS et al. 2000) Ansätze, die für die Objektrekonstruktion aus mehreren Bildern Photoklinometrie bzw. Shape-from-Shading mit Bildzuordnungsverfahren verknüpfen. Es liegt daher nahe, diese Idee im Rahmen der vollständigen Modellierung der Mars-Oberfläche weiter zu verfolgen und den Ansatz des Facetten-Stereosehens entsprechend zu erweitern.

1.4 Gliederung dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die Beschreibung des HRSC-Experiments, den sukzessiven Aufbau des Algorithmus' zur Oberflächenmodellierung und gibt schließlich Resultate für einige Regionen der Mars-Oberfläche, auf deren Basis der Algorithmus diskutiert und bewertet wird.

Im folgenden Kapitel wird eine Einführung zum Untersuchungsgegenstand, dem Planeten Mars, sowie zu dessen Erforschung gegeben. Dabei liegt der Schwerpunkt klar bei der HRSC auf *Mars Express*; die für diese Arbeit relevanten Eigenschaften der Sonde, der Kamera und der Bilddaten werden erläutert. Die Entstehung der Messwerte beruht auf den radiometrischen Eigenschaften der Oberfläche und der Atmosphäre, welche im Kapitel 3 beschrieben werden. Strahlungsphysikalische Grundgrößen und planetare Reflexionsgesetze werden erklärt. Ein Beitrag dieser Arbeit ist dabei auch die zusammenhängende systematische Darstellung der entsprechenden Inhalte.

Im Hauptteil, Kapitel 4 bis 6, wird der Ansatz für die integrierte Modellierung der Mars-Oberfläche beschrieben und auf HRSC-Daten angewendet. Nach einem Überblick über die Objektmodelle und Koordinatensysteme wird deren Bestimmung einschließlich der notwendigen Atmosphärenparametrisierung erklärt. Das Facetten-Stereosehen wird dazu schrittweise um Regularisierungsansätze und die Photoklinometrie erweitert und schließlich mit der Reflexionsmodellierung verknüpft. Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit Aspekten der praktischen Umsetzung des Verfahrens: Bildfilterung, Beobachtungsgeometrie der HRSC und die daraus resultierende, zweckmäßige radiometrische Modellbildung sowie Möglichkeiten zur Kontrolle und Bewertung der Ergebnisse. Für die praktische Anwendung werden Bearbeitungsgebiete aus zwei Regionen der Mars-Oberfläche ausgewählt: der Krater *Gusev* sowie die *Nanedi Valles*. In letzterem liegen Vergleichsdaten aus dem *HRSC DTM Test* vor.

Die Mehrzahl der in dieser Arbeit verwendeten Quellen ist in englischer Sprache verfasst, sodass auch viele Fachbegriffe auf Englisch definiert sind. Dennoch wird hier versucht, deutsche Entsprechungen zu finden. Gegebenenfalls ist das Original zusätzlich genannt.

2 Mars und seine Erforschung: HRSC auf Mars Express

Im Folgenden wird unser Nachbarplanet Mars vorgestellt. Seine charakteristischen Merkmale und für die Oberflächenmodellierung wesentliche Parameter wie Referenzsysteme, Oberflächen- und Atmosphäreigenschaften werden erklärt. Die Mission *Mars Express*, das Design der HRSC, die geometrischen und radiometrischen Eigenschaften der Kamera und der aufgenommenen bzw. vorkorrigierten Bilddaten werden anschließend im Detail erläutert.

Des Weiteren wird auf das *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) eingegangen. Es definiert das genaueste globale Referenzsystem für den Mars und wird folgerichtig in die Prozessierung der HRSC-Bilddaten eingebunden, beispielsweise zur Korrektur der Orientierungsparameter. Für diese Arbeit liefert es auch Startwerte für die DGM-Berechnung.

2.1 Der Planet Mars

Der Mars ist der erdähnlichste Planet unseres Sonnensystems. Sein Abstand zur Sonne beträgt 1,524 AE oder 227,9 Mill. km (große Halbachse des elliptischen Orbits mit einer Exzentrizität von 0,0934). Die Umlaufzeit, ein Mars-Jahr, umfasst 686,98 Erd-Tage bzw. 668,60 Mars-Tage (Sol). Die Tageslänge auf dem Mars ist mit 24 h 37 min 22,663 s nur unwesentlich länger als auf der Erde. Die Rotationsachse des Mars ist um 25,19° gegenüber seiner Bahnebene geneigt, sodass sich Jahreszeiten ergeben (KIEFFER et al. 1992).

Die ersten von einer Raumsonde aufgenommenen Bilddaten lieferte 1965 die amerikanische Mission *Mariner 4*. Einen bedeutenden Beitrag zur Erforschung des Mars haben Ende der 1970er Jahre die beiden *Viking*-Missionen geleistet. Sie lieferten über 50 000 Bilder und deckten die gesamte Oberfläche ab. Zurzeit arbeiten neben *Mars Express* zwei Raumsonden der NASA im Mars-Orbit: *Mars Odyssee* mit dem im sichtbaren und infraroten Spektrum aufzeichnenden *Thermal Emission Imaging System* (THEMIS-VIS bzw. THEMIS-IR) und der *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), auf dem sich u.a. das *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE) sowie die *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars* (CRISM) befinden (siehe auch Abbildung 2.5). Einen Überblick über die Historie der Mars-Missionen und ihre Experimente geben beispielsweise CARR & GARVIN (2001) sowie aus photogrammetrisch-kartographischer Sicht KIRK (2005) und SPIEGEL (2007a). Die Daten werden u.a. durch das *Planetary Data System* der NASA (NASA PDS 2009) frei zur Verfügung gestellt.

2.1.1 Globale Topographie und Referenzkörper

Das genaueste topographische Modell für den gesamten Planeten Mars stammt aus Altimetermessungen von MOLA (Abschnitt 2.3). Anhand dieser Daten haben SMITH et al. (1999, 2001) bestangepasste Ellipsoide berechnet. Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick.

Das Rotationsellipsoid mit einem Äquatorradius von $3\,396,19 \pm 0,10$ km und einem polaren Radius von $3\,376,20 \pm 0,10$ km (DUXBURY et al. 2002) wurde von der *Internationalen Astronomischen Union* (IAU) offiziell bestätigt (SEIDELMANN et al. 2002). Es wird als Lagebezug in der heutigen Mars-Kartographie verwendet (ALBERTZ et al. 2004, KIRK 2005). Planetozentrische Breiten in Kombination mit östlich positiv gezählten Längen bilden das Referenzsystem auf der Mars-Oberfläche; der Bezugsmeridian 0° ist durch den Krater *Airy-0* festgelegt. Neben dem Rotationsellipsoid wird für viele Untersuchungen und nunmehr auch für die systematisch prozessierten HRSC-Orthobilder und DGMs die MOLA-Kugel als Referenz genutzt (GWINNER et al. 2008) – aus verschiedenen Gründen (Einfachheit, Vergleichsdaten in diesem System) auch für die Ableitung von Oberflächenmodellen im Rahmen dieser Arbeit. Ein dreiaxsiges Ellipsoid wird für

den Mars selbst kaum verwendet, hat aber durchaus seine Berechtigung für unregelmäßige Körper wie beispielsweise die Monde des Mars (BUGAEVSKY et al. 1996), Jupiter und Saturn oder auch Asteroiden.

Tabelle 2.1: Aktuelle Lage- und Höhenbezugsflächen für den Mars.

Bezugskörper	Halbachse(n) in [km]			Quelle bzw. Definition
MOLA-Kugel	3 396,00			SMITH et al. (2001)
Ellipsoid IAU 2000	3 396,19	3 376,20		SEIDELMANN et al. (2002), KIRK (2005)
Dreiaxsiges Ellipsoid	3 398,63	3 393,76	3 376,20	SMITH et al. (1999, 2001)
Areoid	3 396,00	(Mittel am Äquator)		SMITH et al. (1999)

Ellipsoide können theoretisch auch als Höhenbezug dienen. Praktisch werden allerdings vielfach die MOLA-Kugel oder das Areoid verwendet. Als Areoid („Mars-Geoid“) ist diejenige Niveauläche des Schwerefeldes definiert, die in ihrem mittleren Äquatorradius dem der MOLA-Kugel, d.h. 3 396,00 km, entspricht (SMITH et al. 1999). Das Schwerefeld des Mars ist aus Daten unterschiedlicher Missionen bestimmt worden. Damit stehen auch tabellierte Areoid-Undulationen zur Verfügung, anhand derer auf die Kugel bezogene Höhen in Areoid-Höhen transformiert werden können. Letztere sind für wissenschaftliche Analysen der Oberflächentopographie, z.B. von Fließstrukturen, unabdingbar.

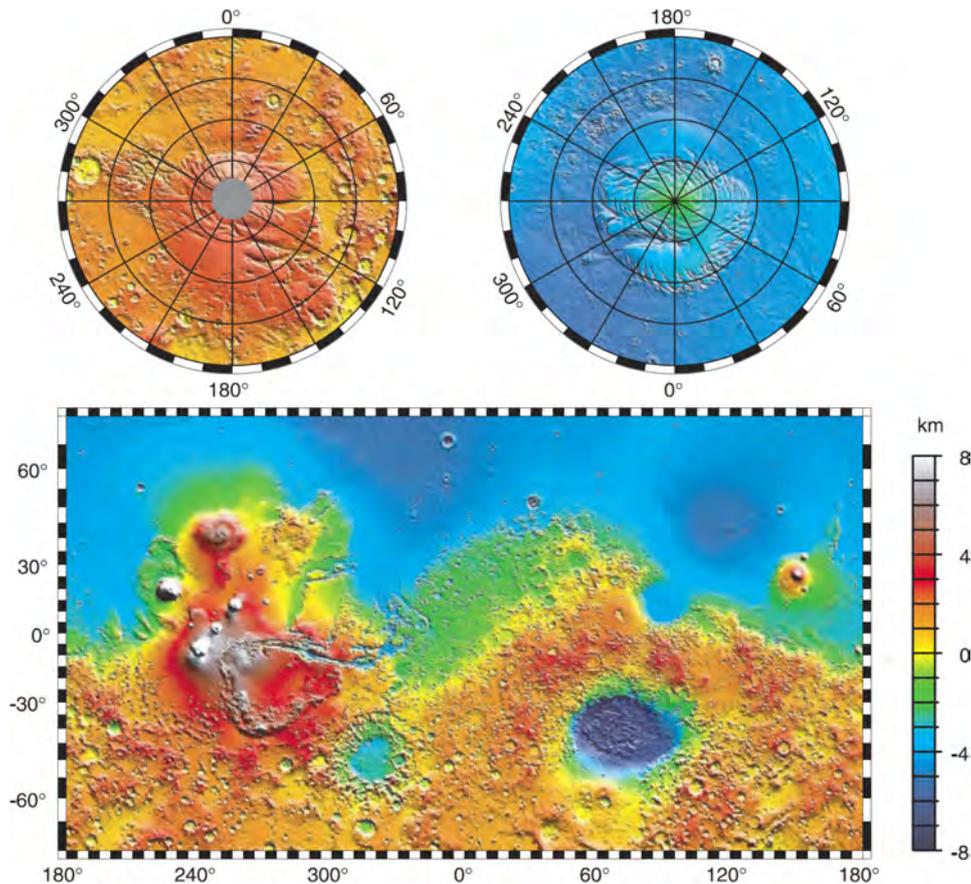


Abbildung 2.1: Topographie der Mars-Oberfläche aus MOLA-Daten (SMITH et al. 1999). Höhenbezug ist das Areoid.

Die globale Topographie des Mars zeigt eine deutliche Zweiteilung (Dichotomie) in die nördliche Tiefebene, *Vastitas Borealis*, und das südliche Hochland (Abbildung 2.1). Im Grenzbereich liegen die 3 769 km langen *Valles Marineris*, die ins nördliche Tiefland münden, sowie die *Elysium*- und die *Tharsis*-Region.

Beide Regionen wurden durch vulkanische und tektonische Aktivitäten geformt, wobei letztere nicht durch die von der Erde bekannten, horizontalen Plattenverschiebungen sondern durch vertikale Hebungen und Senkungen gekennzeichnet sind. Der größte der *Tharsis*-Vulkane ist *Olympus Mons*, der mit einer Höhe von 21 287 m (bei 17,35° Nord und 226,31° Ost) zugleich die höchste Erhebung auf der Mars-Oberfläche darstellt. Der mit -8 180 m niedrigste Punkt liegt in der *Hellas Planitia* (bei 32,81° Süd und 62,02° Ost). Der Mars weist damit eine Höhendynamik von fast 30 km auf, die größte unter den terrestrischen Planeten (SMITH et al. 1999). Sowohl der Nord- als auch der Südpol sind von Eiskappen unterschiedlicher Zusammensetzung (Wasser- und CO₂-Eis) bedeckt, deren Ausmaße jahreszeitlichen Veränderungen unterliegen.

Die Dichotomie der Mars-Oberfläche spiegelt sich auch in der Rauigkeit wider: Während große Teile der Nordhalbkugel bezogen auf die MOLA-Basislinie von 330 m (siehe Teilabschnitt 2.3.1) Neigungen von unter 10° aufweisen, zeigt das südliche Hochland für denselben Maßstab eine stärkere Reliefenergie. Lokale Neigungen von mehr als etwa 50° kommen jedoch äußerst selten vor, beispielsweise an den Steilhängen der *Valles Marineris* – vgl. Kartendarstellung der Rauigkeit („interquartile scale surface roughness“) in SMITH et al. (1999).

2.1.2 Aufbau der Mars-Oberfläche

Der Mars ist durch eine Vielzahl von Einschlagkratern gekennzeichnet, allein über 42 000 mit Durchmessern von mehr als 5 000 m (BARLOW et al. 2005). Ihre heterogene Verteilung lässt auf das unterschiedliche Alter der Oberfläche schließen – die Häufigkeit von Meteoriteneinschlägen ermöglicht die Altersbestimmung (z.B. NEUKUM et al. 2004).

Durch Meteoriteneinschläge wird das Oberflächengestein sowohl physikalisch als auch chemisch verändert, d.h. zertrümmert und aufgeschmolzen. Dabei entsteht eine Trümmerschicht, welche in der Planetologie allgemein als Regolith bezeichnet wird (SCHULTZ 2001). Die Mars-Oberfläche wurde und wird allerdings durch eine Reihe weiterer Vorgänge geformt, welche auch Erosion und Sedimentation durch Lava, Wasser und Wind umfassen, sodass hier die Bezeichnung Mars-Boden (*Martian soil*) – freilich ohne organische Anteile – verwendet wird. Insbesondere die jüngeren Gebiete des nördlichen Tieflandes, das deutlich weniger Krater aufweist als das südliche Hochland, bestehen aus Ablagerungen von Vulkanströmen sowie äolischen und fluvialen Sedimenten. In der Frühzeit könnte hier ein Ozean existiert haben. Die Umgebung der Polkappen besteht aus erodierten Ebenen, geschichteten Sedimentdecken und Dünen. Weite Teile der Mars-Oberfläche sind von einer Staubschicht aus Eisenoxid bedeckt, woraus die rötliche Färbung des Planeten resultiert.

Das Erscheinungsbild der Oberfläche ist stark vom Betrachtungsmaßstab, d.h. von der radiometrischen und vor allem von der geometrischen Auflösung der Bilddaten, abhängig. Durch erdgebundene Beobachtungen lassen sich lediglich regionale Albedounterschiede ausmachen. Im Auflösungsbereich der meisten aus dem Orbit aufgenommenen Bilddaten einschließlich der der HRSC auf *Mars Express* dominieren die durch topographische Formenvielfalt verursachten Schatten und Schattierungen, während die Materialeigenschaften weniger stark variieren. Bildauflösungen im Dezimeterbereich dagegen zeigen auch feinere Strukturen sowie einzelne Felsbrocken und ermöglichen so die diskrete Unterscheidung verschiedener Materialien (vgl. Abbildung 2.2). Die Oberfläche kann als quasifraktale Struktur angesehen werden, wobei der Geländetopographie lokale Neigungen unterschiedlicher Maßstäbe überlagert sind, bis schließlich die Ebene der Einzelteilchen erreicht ist – wiederum von größeren Agglutinaten („Klumpen“) bis hin zu den Staubpartikeln, die den Mars bedecken (vgl. SHEPHARD & CAMPBELL 1998). Dies veranschaulichen beispielhaft die Dünenformationen in Abbildung 2.2.

Sowohl die radiometrischen Eigenschaften der Einzelteilchen als auch die Oberflächenstruktur beeinflussen die richtungsabhängige Reflexion, sodass aus Reflexionsparametern der Rückschluss auf Materialeigenschaften möglich ist.

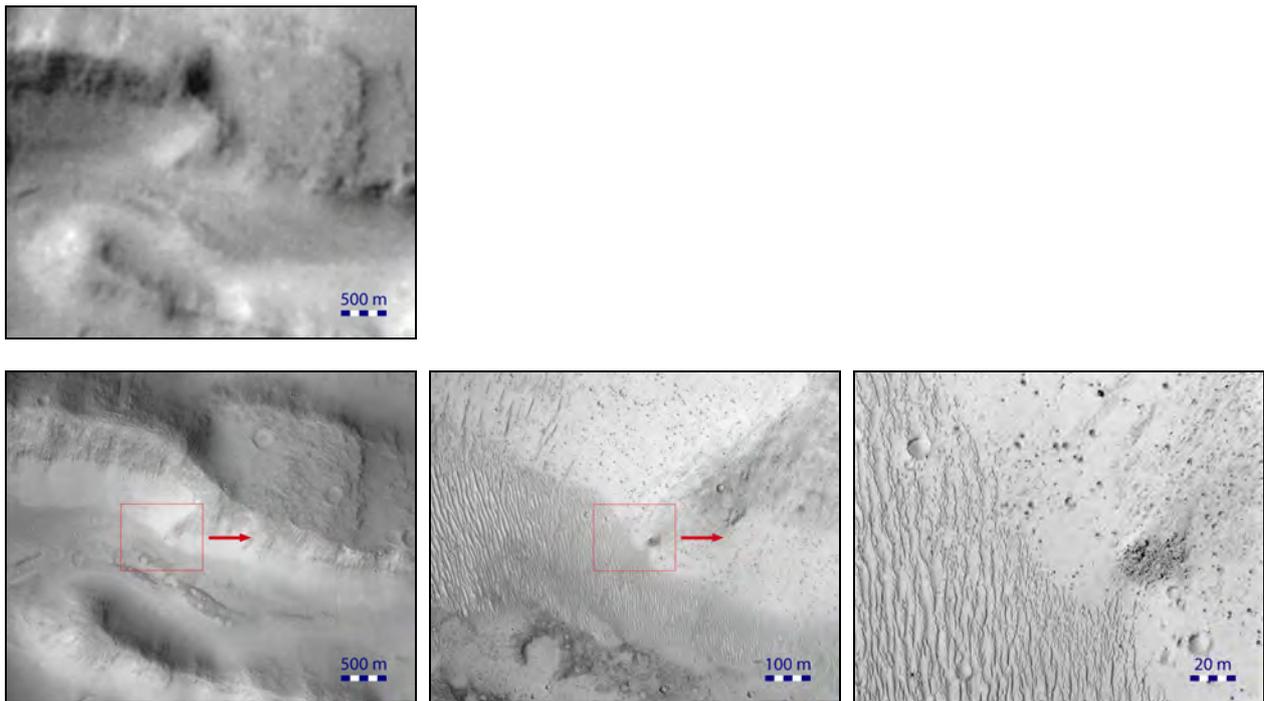


Abbildung 2.2: Maßstabsabhängigkeit der Textur der Mars-Oberfläche am Beispiel der *Nandedi Valles*. Oben: HRSC-Ortbild mit einer Bodenauflösung von 25 m. Unten: HiRISE-Aufnahme in 27 cm Auflösung, v.l.n.r. ein dem HRSC-Bild identischer Ausschnitt sowie zwei Vergrößerungen des jeweils zentralen Bildteils (Kennzeichnung als Rechtecke). In der HRSC-Szene erscheinen Bereiche des Tals und des Plateaus relativ homogen. Dasselbe Gebiet wirkt in der HiRISE-Aufnahme (links) aufgrund der höheren geometrischen und radiometrischen Auflösung schärfer, zeigt aber ähnlich homogene Abschnitte. In den Vergrößerungen werden hier Dünenformationen und im größten Maßstab (rechts) sogar anstehendes Gestein sichtbar, das sich deutlich vom umgebenden Boden abhebt. Quelle der HiRISE-Daten: *University of Arizona* (2009).

2.1.3 Atmosphäre

Die Atmosphäre des Mars besteht hauptsächlich aus Kohlendioxid und enthält nur wenig Sauerstoff oder Wasserdampf (Tabelle 2.2). Während der Luftdruck auf der Mars-Oberfläche mit 6,1 mbar deutlich unter den 1 013 mbar der Erde liegt, ist er mit rund 0,0001 mbar in 100 km Höhe für beide Planeten etwa gleich. Die Mächtigkeit der Atmosphärenschichten auf dem Mars ist denen der Erde ähnlich, wobei nicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre unterschieden wird, sondern diese allgemein als untere Atmosphäre bezeichnet werden. Die obere Atmosphäre (Thermosphäre) beginnt bei ca. 110 km Höhe (ZUREK 1992).

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der unteren Mars-Atmosphäre nach OWEN (1992).

Gas		Anteil
Kohlendioxid	CO ₂	95,32%
Stickstoff	N ₂	2,7 %
Argon	⁴⁰ Ar	1,6 %
Sauerstoff	O ₂	0,13%
Kohlenmonoxid	CO	0,07%
Wasserdampf	H ₂ O	0,03%
Sonstige	³⁶⁺⁴⁰ Ar, Ne, Kr, ...	

Die Atmosphäre unterliegt sowohl jahreszeitlichen als auch täglichen Schwankungen. So weisen beispielsweise Krater ein von der Bestrahlung abhängiges Mikroklima auf. Staubstürme können regionale und sogar globale Ausmaße annehmen und die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre deutlich verändern. Lokal können sich Wolken und Wirbelstürme (*dust devils*) bilden. Die Analyse ihrer Dimension und Bewegung ist eines der vielfältigen Forschungsgebiete, für das die kurz aufeinander folgenden Stereoaufnahmen der HRSC prädestiniert sind: Typische Geschwindigkeiten liegen bei 10-20 m/s (STANZEL et al. 2006).

Im Hinblick auf die Oberflächenmodellierung aus Bildern lässt sich festhalten, dass die Atmosphäre grundsätzlich die Datenaufnahme beeinflusst. Dieser Einfluss kann global und insbesondere auch lokal schwanken; siehe dazu Abschnitte 3.2 und 4.8.1.

2.2 Das Kameraexperiment HRSC auf Mars Express

Mars Express ist die erste Raumfahrtmission der *European Space Agency* (ESA) zu einem Planeten. Die in der Planetenforschung bisher einzigartige HRSC kann als das wichtigste Instrument auf dem Orbiter angesehen werden. Es erfährt durch die bildhafte Aufnahme der Mars-Oberfläche auch die größte Beachtung in der Öffentlichkeit. Das HRSC-Experiment wird vom Principal Investigator (PI) GERHARD NEUKUM von der *Freien Universität Berlin* geleitet. Außerdem sind über 40 Co-Investigatoren (CoI) aus zehn Ländern mit ihren Wissenschaftlerteams in das Vorhaben eingebunden. Die Bandbreite der Fachrichtungen innerhalb des *HRSC Science Teams* – organisiert in vier Arbeitsgruppen: Photogrammetrie und Kartographie, Geowissenschaften, Spektrophotometrie, Atmosphärenforschung – unterstreicht das große Potential der HRSC-Daten.

Einen Überblick über die Mission *Mars Express* geben CHICARRO et al. (2004). Die HRSC ist in NEUKUM et al. (2004), ALBERTZ & NEUKUM (2005) und, mit den wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnissen der nominalen Missionsphase von 2004 bis 2006, in JAUMANN et al. (2007) beschrieben.

2.2.1 Mission Mars Express

Die Mission *Mars Express* ist am 2. Juni 2003 vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur gestartet und am 25. Dezember 2003 in den ersten Mars-Orbit eingeschwenkt. Seit Januar 2004 liefert die Mission Daten von unserem Nachbarplaneten. Während die Landeeinheit *Beagle 2* verschollen ist, arbeiten an Bord des *Mars-Express*-Orbiters insgesamt sieben Experimente, darunter verschiedene Spektrometer (z.B. OMEGA, das *Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité*), ein Radar-Instrument und die in Deutschland konzipierte und gebaute Kamera HRSC.

Um optimale Beobachtungsbedingungen für die unterschiedlichen Instrumente zu schaffen – z.B. Atmosphärenbeobachtungen aus großer Distanz, vor allem aber die hochauflösende Bildaufnahme aus geringer Flughöhe –, ist der nahezu polare *Mars-Express*-Orbit sehr elliptisch. Die Entfernung zum Mars liegt bei 287 km im Perizentrum und seit der Reduktion im Mai 2004 bei 10 117 km im Apozentrum. Damit ergibt sich eine Umlaufzeit von 6,72 Stunden (JAUMANN et al. 2007). Die Lage des Perizentrums wandert im Laufe der Mission, sodass sich unterschiedliche Beobachtungskonstellationen einhergehend mit variierender Bestrahlung ergeben.

2.2.2 Die High Resolution Stereo Camera (HRSC) im Überblick

Der Zeilenscanner HRSC war ursprünglich an Bord der gescheiterten russischen Mission *Mars 94/96* gestartet (ALBERTZ et al. 1992, NEUKUM et al. 1996). Für die *Mars-Express*-Mission wurde das Kamerasystem technisch leicht modifiziert. Eine wesentliche Ergänzung ist der *Super Resolution Channel* (SRC), welcher, mit einem 1024 x 1024 Pixel großen Array ausgestattet, panchromatische Bilddaten in etwa fünffach höhe-

erer Bodenauflösung als die HRSC ermöglicht (ALBERTZ & NEUKUM 2005, OBERST et al. 2008). Während solche Detailaufnahmen in Kombination mit den HRSC-Daten beispielsweise die visuellen Interpretationsmöglichkeiten verbessern, sind sie als Einzelbilder für die Ziele dieser Arbeit von geringem Nutzen und werden daher nicht weiter betrachtet.

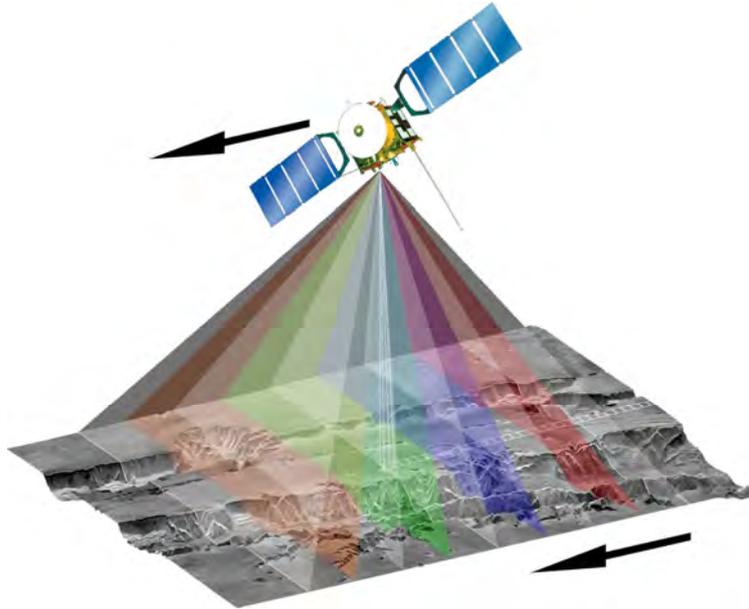


Abbildung 2.3: Prinzip der HRSC-Datenaufnahme. Die fünf panchromatischen und vier spektralen Bilder entstehen durch die kontinuierliche Aufnahme während des Überfluges über die Mars-Oberfläche. Quelle: *FU Berlin* (2008).

Die HRSC auf *Mars Express* ist speziell unter photogrammetrisch-kartographischen sowie photometrischen Gesichtspunkten konzipiert worden: Mit ihr wird die Oberfläche unseres Nachbarplaneten erstmals systematisch in Farbe und Stereo aufgenommen. Innerhalb einer Aufnahmesequenz (Bildstreifen) werden dabei gleichzeitig vier Spektralkanäle (rot, grün, blau und infrarot) sowie fünf panchromatische Kanäle erfasst, letztere angeordnet in Stereowinkeln von $0,0^\circ$ (Nadirkanal), $\pm 12,9^\circ$ (Photometriekanäle) und $\pm 18,9^\circ$ (Stereokanäle), vgl. Tabelle 2.3. Die Bildstreifen entstehen durch das kontinuierliche Scannen während der Vorwärtsbewegung der Raumsonde in ihrem Orbit. Sie werden für jeden der neun Kanäle Zeile für Zeile zusammengesetzt (Abbildung 2.3). Die maximale Bodenauflösung beträgt im marsnächsten Punkt des Orbits ca. 10 m/Pixel für den Nadirkanal. Die Bilddaten der Stereo- und Photometriekanäle werden in der Regel in geringerer Auflösung gespeichert, d.h. 2×2 , 4×4 , seltener auch 8×8 Pixel werden zu Makropixeln zusammengefasst (NEUKUM et al. 2004, JAUMANN et al. 2007).

Die Breite der HRSC-Bilder kann theoretisch 5 184 Pixel betragen; sie reduziert sich in Abhängigkeit vom Makropixelformat. Die Streifenlänge wird je nach Bearbeitungsgebiet, möglicher Datenrate beim Download u.ä. sinnvoll gewählt. Während der nominellen Mission, zwischen Januar 2004 und November 2005, sind insgesamt 79,7 Mio km², was 54,9% der Mars-Oberfläche entspricht, durch die HRSC aufgenommen worden (JAUMANN et al. 2007, vgl. Abbildung 2.4).

Die systematische Stereoaufnahme innerhalb eines Orbits ist in der Planetenforschung bisher einzigartig. Damit kommt der HRSC eine besondere Bedeutung für die Ableitung von DGMs zu. Daneben wird die Bestimmung photometrischer Modelle durch die (nahezu) gleichzeitige Aufnahme ein- und derselben Fläche aus verschiedenen Beobachtungsrichtungen ermöglicht. Mit den zusätzlich bereitgestellten Farbdaten bietet die HRSC die Möglichkeit, in einigen Jahren nicht nur DGMs sondern auch Farb-Orthobilder für den gesamten Mars in vergleichsweise hoher Auflösung abzuleiten und die bisher existierenden Datensätze entscheidend zu verbessern. Die HRSC stellt damit das Bindeglied zwischen verschiedenen Kamera- und abbildenden Spektrometerexperimenten dar (Abbildung 2.5).

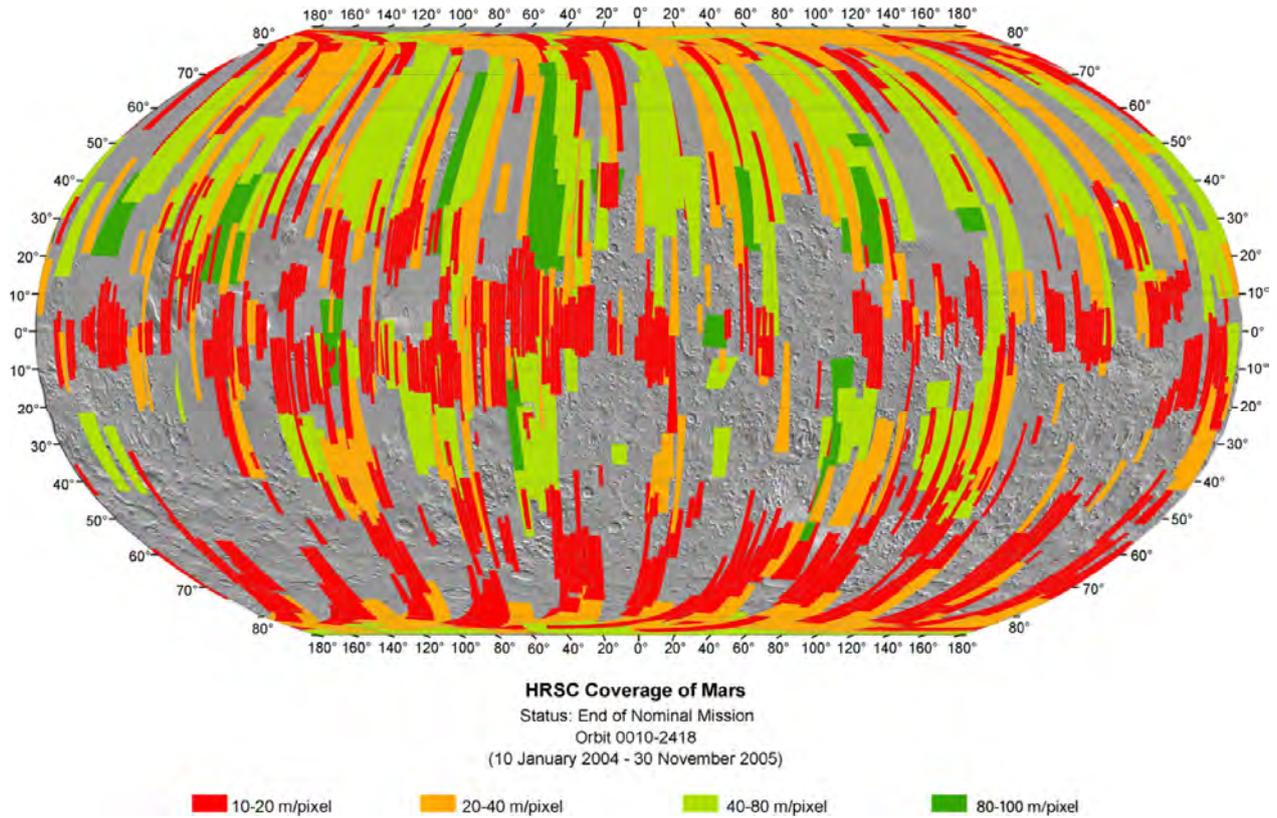


Abbildung 2.4: Abdeckung der Mars-Oberfläche durch die HRSC während der nominellen Mission vom 10.01.2004 bis zum 30.11.2005, etwa ein Mars-Jahr. Die Farben sind unterschiedlichen Bodenauflösungen zugeordnet (JAUMANN et al. 2007).

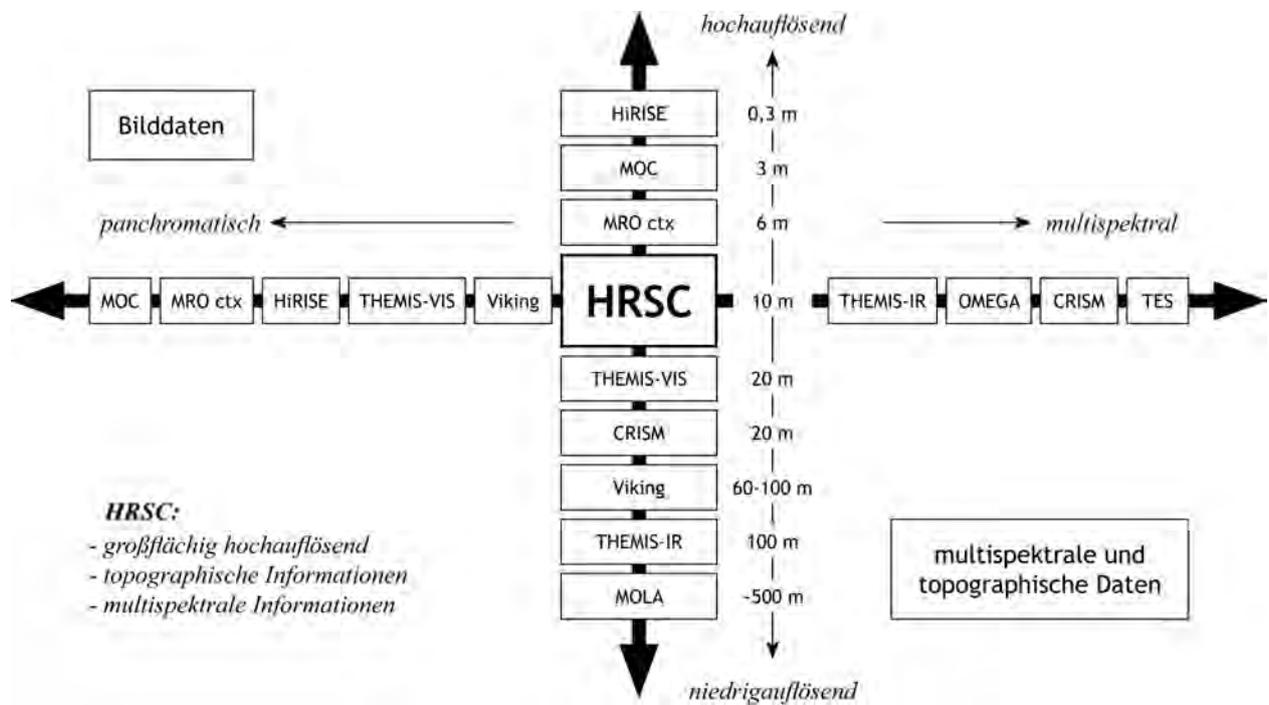


Abbildung 2.5: HRSC im Vergleich zu anderen Kamera- und Multispektral-Experimenten sowie MOLA, nach HAUBER (2007).

2.2.3 Kameraaufbau, Orientierung und Kalibrierung

2.2.3.1 Innere Orientierung und Zeilenaufbau

Die Brennweite der HRSC-Optik beträgt 175 mm. In der Bildebene sind neun CCD-Zeilen parallel zueinander und quer zur Flugrichtung angeordnet, woraus die in Tabelle 2.3 angegebenen Stereowinkel von bis zu 18,9° resultieren. Die Schwadbreite (*swath width*) beträgt 11,8° und folgt aus der Zeilenlänge: Jede Zeile besteht aus insgesamt 5 272 Pixeln von 7 µm Größe, von denen 5 184 kalibriert sind und für die Bildaufnahme genutzt werden. Eine detaillierte Analyse der vor dem Start von *Mars Express* durchgeführten geometrischen Kamerakalibrierung kann DUXBURY (2002) entnommen werden.

Tabelle 2.3: Kanäle der HRSC mit ihrer Anordnung in der Bildebene, den sich daraus ergebenden Stereowinkeln und Filtereigenschaften.

Sensorzeile(n)	Anordnung (Bildkoordinate y)	Stereowinkel	Wellenlänge / Bandbreite
Nadir	0 mm	0,0°	675 ± 90 nm
Stereo 1/2	±60 mm	±18,9°	675 ± 90 nm
Photometrie 1/2	±40 mm	±12,9°	675 ± 90 nm
Blau	+10 mm	+3,3°	440 ± 45 nm
Grün	-10 mm	-3,3°	530 ± 45 nm
Rot	+50 mm	+15,9°	750 ± 20 nm
Infrarot	-50 mm	-15,9°	970 ± 45 nm

Bei der Aufnahme können 2 x 2, 4 x 4 oder auch 8 x 8 benachbarte Pixel zu Makropixeln zusammengefasst werden (*binning*). Die dabei durch Kompression verfälschten Randpixel (inaktive werden hier gemeinsam mit aktiven Pixeln komprimiert²) werden dann nicht mit ausgewertet.

Die vor dem Missionsstart durchgeführte geometrische Kalibrierung basiert auf Messungen für jedes 400. Pixel jeder HRSC-Zeile und kubischen Spline-Interpolationen für die dazwischen liegenden Pixel (JAUMANN et al. 2007). Im Zuge einer Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung (s.u.) wurden die Parameter der inneren Orientierung neu bestimmt und dabei teils signifikant verbessert. Änderungen gegenüber den ursprünglich bestimmten Werten sind in SPIEGEL (2007a) dokumentiert und analysiert.

Für diese Arbeit werden die neu bestimmten Pixelkoordinaten (x,y) im Zusammenhang mit der Kamera-konstanten $c = 175$ mm verwendet.

2.2.3.2 Äußere Orientierung

Die Bahn der Sonde *Mars Express* wird vom *European Space Operation Centre* (ESOC) in Darmstadt aus Dopplerverschiebungen zu terrestrischen Stationen (Perth, Kourou) bestimmt. Dies geschieht etwa 15mal pro Orbit – allerdings nur, wenn keine der an Bord befindlichen Instrumente arbeiten. Die Bahn wird anschließend anhand des Schwerefeldes rekonstruiert. Die äußere Orientierung der HRSC wird also vor

² HRSC-Daten werden online mit der JPEG-basierten Diskreten Kosinustransformation (DCT) komprimiert. Dabei werden jeweils 8 x 8 (Makro-)Pixel gemeinsam transformiert (JAUMANN et al. 2007).

und nach der Aufnahme gemessen und über den Bildstreifen interpoliert (JAUMANN et al. 2007, SPIEGEL 2007a). Die Ausrichtung der Sonde erfolgt anhand des Sternensensors mittels Kreiseln.

Die rekonstruierten Orbits weisen eine Positionsgenauigkeit im Bereich von 100 bis 1 500 m auf. Diese kann durch Bündelblockausgleichung sowohl relativ als auch absolut deutlich gesteigert werden. Das Prinzip der Ausgleichung ist im Detail in SPIEGEL et al. (2005) und SPIEGEL (2007a) beschrieben. Sie basiert auf der Bestimmung von Verknüpfungspunkten zwischen den einzelnen HRSC-Kanälen (SCHMIDT et al. 2005, SCHMIDT 2008) und umfasst die Korrektur und Anpassung der Parameter der äußeren Orientierung an die MOLA-Referenz (siehe Abschnitt 2.3). Die erreichbare Positionsgenauigkeit hängt in erster Linie von der Bildauflösung ab; sie kann auf ca. 30 m gesteigert werden (SPIEGEL et al. 2005).

Von den ersten 5 000 *Mars-Express*-Orbits mit etwa 1 900 HRSC-Bildstreifen haben SCHMIDT (2008) und SPIEGEL (2007a) 60% ausgewertet. Für den Rest der Daten war die Verbesserung aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich (Staubstürme, Datenlücken, Überbelichtung, geringe Auflösung und ähnliche Einflussfaktoren) oder gar nicht sinnvoll, da nicht die Mars-Oberfläche sondern die Atmosphäre (*limb sounding*) oder der Mars-Mond Phobos beobachtet wurden. Für die Datenprozessierung wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet: die Bündelblockausgleichung zur ausschließlichen Korrektur der äußeren Orientierungen sowie die Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung.

Die verbesserten Orientierungsdaten stehen schließlich für jede einzelne von der HRSC aufgenommene Bildzeile bereit. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit gemeinsam mit der neu kalibrierten inneren Orientierung verwendet.

2.2.3.3 Radiometrische Kalibrierung

Die HRSC verfügt über fünf panchromatische Sensoren und vier weitere Spektralkanäle: rot, grün, blau und infrarot. Die radiometrische Auflösung der Kamera beträgt 8 Bit, wobei die realen Bilddaten wegen der Vermeidung möglicher Über- oder Unterbelichtungen eine geringere Auflösung besitzen, lokal etwa 6-7 Bit. Das Signal-Rausch-Verhältnis (*signal to noise ratio*, SNR) wird von JAUMANN et al. (2007) mit > 40 für blau, > 80 für die übrigen Farben und > 100 für die panchromatischen Kanäle angegeben.³

Die HRSC ist derart kalibriert, dass aufgezeichnete Intensitäten bzw. Bildgrauwerte (*digital numbers*, DN) der einzelnen Sensoren linear in Reflexionsfaktoren RADF („*radiance factor*“, Definition im Abschnitt 3.4.4) transformiert werden können (JAUMANN et al. 2007). Diese werden im Folgenden als radiometrische Beobachtungsgröße der HRSC aufgefasst. Aufgrund der radiometrischen Auflösung und des SNR wird 1 DN, umgerechnet in RADF, als Beobachtungsgenauigkeit der panchromatischen Kanäle angenommen.

2.2.4 Prozessierung der HRSC-Daten

Die systematische Verarbeitung sämtlicher von der HRSC aufgenommener Bilddaten gliedert sich in die Prozessierung der Rohdaten – d.h. die Bereitstellung von radiometrisch korrigierten, zeilenweise vorliegenden Daten (Level 2) – und die Ableitung photogrammetrischer Produkte (Level 4a). Die radiometrische Kalibrierung und die photogrammetrische Prozessierung sind Aufgabe des DLR in Berlin-Adlershof, wobei es durch die Photogrammetrie/Kartographie-Arbeitsgruppe des *HRSC Science Teams* unterstützt wird. Innerhalb weniger Tage nach Datenaufnahme werden dabei DGMs mit Rasterweiten von 50 m bis 200 m und darauf aufbauend farbige Orthobildmosaike mit Auflösungen bis zu 12,5 m erstellt (SCHOLTEN et al. 2005, JAUMANN et al. 2007, GWINNER et al. 2007, 2008). Diese Level-4a-Daten stellen die Grundlage für die systematische Weiterverarbeitung (Level 4b) wie die Umsetzung in Kartenprodukte (ALBERTZ et al.

³ Obwohl die panchromatischen Kanäle nominell die gleiche Bandbreite aufzeichnen (vgl. Tabelle 2.3), weisen sie einen leicht unterschiedlichen Dynamikumfang auf.

2004, GEHRKE & NEUKUM 2005, GEHRKE et al. 2006) und für verschiedenste Analysen und Interpretationen innerhalb des *HRSC Science Teams* dar. Im Hinblick auf die vollständige Oberflächenmodellierung im Rahmen dieser Arbeit soll hier beispielhaft die Ableitung von Reflexionsmodellen genannt werden (PINET et al. 2005, JEHL et al. 2006, 2008). Eine Übersicht über die einzelnen Prozessierungsschritte und Produktspezifikationen gibt Abbildung 2.6.

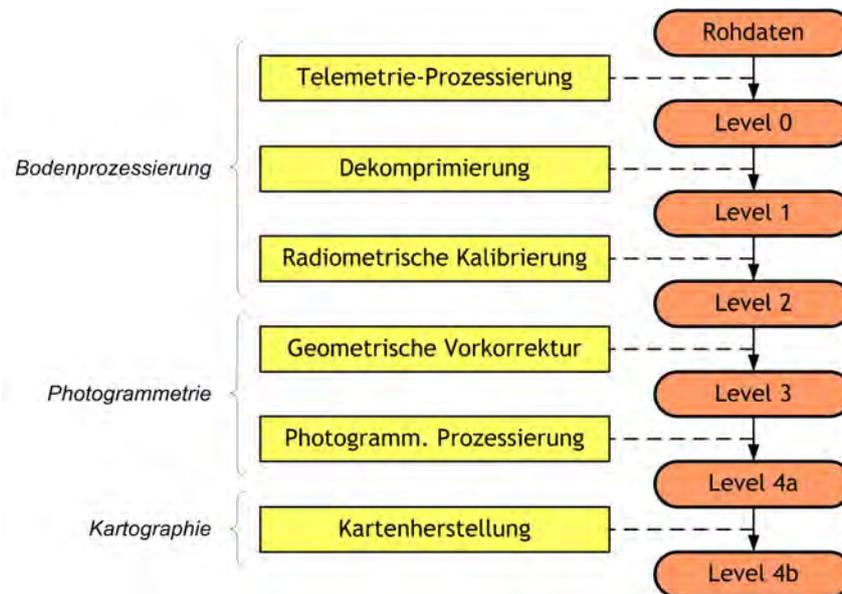


Abbildung 2.6: Schritte der systematischen Verarbeitung von HRSC-Daten und entsprechende Datenlevel, nach SCHOLTEN et al. (2005) und ALBERTZ & NEUKUM (2005).

Neben der Auswertung am DLR wurden und werden für HRSC-Daten exemplarisch auch andere photogrammetrische Ansätze untersucht, die ähnlich wie die systematische Prozessierung auf klassischer Bildzuordnung basieren (GWINNER et al. 2005, HIRSCHMÜLLER et al. 2006, KIRK et al. 2006, DUMKE et al. 2008) oder DGMs mittels Shape-from-Shading bzw. Photoklinometrie verfeinern (DORRER et al. 2005, KIRK et al. 2003, 2006). Die Verfahren und Ergebnisse wurden im Rahmen des *HRSC DTM Tests* von HEIPKE et al. (2006, 2007) verglichen; siehe dazu Abschnitt 5.5.

Die in Abbildung 2.6 dargestellte systematische Prozessierung der HRSC-Daten erfolgt mit den Programmsystemen VICAR (MIPL 2009) und PIMap (GEHRKE & NEUKUM 2005), wobei letzteres für die automatisierte Kartenherstellung entwickelt wurde. Das dabei verwendete VICAR-Dateiformat beinhaltet die unkomprimierte Datenmatrix sowie den VICAR-Header, in dem anhand sogenannter System-, Property- und History-Label die Bildeigenschaften – beispielsweise die Georeferenzierung oder radiometrische Transformationsparameter – und einzelne Bearbeitungsschritte dokumentiert sind (FU Berlin 2009).

Grundlage dieser Arbeit sind die dekomprimierten und radiometrisch kalibrierten Level-2-Daten mit den Orientierungsparametern für jede Bildzeile entsprechend dem obigen Abschnitt 2.2.3.2. Die Ergebnisse stellen Level-4a- bzw. Level-4b-Produkte entsprechend der HRSC-Produktspezifikation dar. Die in der Modellierung mitbestimmten radiometrischen Oberflächen- und Atmosphärenparameter sind üblicherweise Ergebnisse weiterführender Forschungen.

2.3 Das Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)

Das *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) ist am 7. November 1997 auf der amerikanischen Mission *Mars Global Surveyor* gestartet. Hauptziel des Experiments war die globale Erfassung der Mars-Topographie. Bis

Juni 2001 hat MOLA mehr als 640 Millionen einzelne Höhen mit Genauigkeiten im Meterbereich gemessen, auf deren Grundlage das genaueste Referenzsystem für den Planeten definiert ist.

Neben der Bestimmung absoluter Höhen konnten aus MOLA-Daten auch deren zeitliche Veränderungen (z.B. Mächtigkeit der polaren Eiskappen), die Oberflächenrauigkeit sowie das Reflexionsvermögen von Oberfläche und Atmosphäre im Bereich der Laserwellenlänge bestimmt werden (SMITH et al. 1999, 2001, NASA PDS 2009).

2.3.1 Instrument und Dateneigenschaften

MOLA besteht aus einer Sende- und einer Empfangseinheit. Laserimpulse mit einer Wellenlänge von 1 064 nm (nahes infrarot) und einer Länge von 8 ns werden mit einer Frequenz von 10 Hz ausgesendet, sodass sich bei 400 km Flughöhe⁴ ein Profil mit einem Punktabstand von etwa 330 m ergibt. Die Ausdehnung des Lasers (MOLA-Spot) beträgt auf der Mars-Oberfläche 168 m. Abhängig von der Topographie sind daher die reflektierten Signale mehr oder weniger verzerrt. Sie werden von vier verschiedenen Empfangskanälen unterschiedlicher Empfindlichkeit detektiert (ABSHIRE et al. 2000). Der Abstand der Orbits nimmt mit wachsender Entfernung vom Äquator ab, wobei aufgrund der Bahninklination für die Polgebiete selbst (Breiten ab 88°) nur wenige Messungen vorliegen. In äquatorialen Gebieten kann der Abstand zwischen den Profilen mehrere Kilometer betragen.

Die zeitliche Auflösung der Laserpulsmessung ist 2,5 ns, woraus eine theoretische Höhenauflösung von 37,5 cm resultiert. Die tatsächliche vertikale Genauigkeit, die auch radiale Orbitfehler einbezieht, liegt bei 1 m. Sie nimmt im bewegten Gelände aufgrund der Messfeldgröße und der geringeren Empfindlichkeit des entsprechenden Sensors ab und beträgt bei 30° Neigung etwa 10 m. Die horizontale Genauigkeit erreicht eine Größenordnung von 100 m (SMITH et al. 2001). Grob fehlerhafte Messungen können beispielsweise durch Reflexionen an Wolken oder im Bereich der Laserwellenlänge detektierte Sonnenstrahlung – nach SMITH et al. (1999) weniger als 0,5% der Messungen – verursacht werden. Einige MOLA-Profile weisen systematische Höhenfehler im Kilometerbereich auf (HAASE 2003, DORNINGER et al. 2004).

Die in den einzelnen Profilen gemessenen und abgeleiteten Daten einschließlich der Höhen bezüglich der MOLA-Kugel werden als *Precision Experiment Data Records* (PEDRs) bereitgestellt. Diese wurden bzw. werden von Zeit zu Zeit neu berechnet, enthalten aber immer noch einige Fehler. Aus den Daten wurden globale DGMs in Auflösungen von $2^6 = 64$ Punkten pro Grad (926 m am Äquator bzw. Meridian) sowie $2^7 = 128$ Punkten pro Grad (463 m) abgeleitet, die so genannten *Mission Experiment Gridded Data Records* (MEGDRs). In diesen Raster-DGMs sind fehlerhafte Höhenmessungen weitgehend eliminiert (NASA PDS 2009).

2.3.2 MOLA als Referenz für die HRSC-Datenprozessierung

Da MOLA das genaueste globale Koordinatensystem definiert, werden die HRSC-Daten während ihrer Prozessierung angepasst; hierfür wird das bestaufgelöste MEGDR verwendet. Die Anpassung erfolgt durch die Einbeziehung des DGMs in die Bündelblockausgleichung zur Verbesserung der Orientierungsparameter (Abschnitt 2.2.3.2). Des Weiteren dienen MOLA-Daten als Näherungswerte der DGM-Berechnung aus HRSC-Bildern, sowohl bei der systematischen Prozessierung (SCHOLTEN et al. 2005, GWINNER et al. 2007) als auch für andere Auswertansätze (ALBERTZ et al. 2005, HEIPKE et al. 2005, 2007 und Quellen darin). Auch die Oberflächenmodellierung im Rahmen dieser Arbeit basiert auf MOLA-korrigierten äußeren Orientierungen der HRSC.

⁴ Der Orbit des *Mars Global Surveyor* ist nur wenig elliptisch. Die Flughöhe variiert zwischen 370 km und 430 km.

Als Startmodell für die DGM-Berechnung dient hier ein auf 5 km Lageauflösung herunterskaliertes MOLA-DGM, welches zu Beginn der Mission *Mars Express* auch für die systematische Prozessierung der HRSC-Daten am DLR diente. Erste theoretische Untersuchungen (ANDERSSOHN 2004) und praktische Berechnungen (GEHRKE & HAASE 2006a, 2006b, HAASE 2007) haben gezeigt, dass dieser Datensatz für die DGM-Ableitung mit dem Facetten-Stereosehen ausreicht.

Die originalen Höhenmessungen, d.h. die auf die MOLA-Kugel bezogenen Höhen der PEDR-Profile, werden als Vergleichsdaten für die hier berechneten DGMs herangezogen, auch wenn letztere aufgrund der MOLA-Anpassung der Orientierungen nicht vollkommen unabhängig sind. Die MOLA-Spots weisen, zumindest im ebenen Gelände, eine signifikant bessere Genauigkeit als HRSC-DGMs auf (vgl. HEIPKE et al. 2006, 2007).

3 Radiometrische Grundlagen und Reflexionsmodelle

Wenn elektromagnetische Strahlung auf Materie trifft, wird sie anteilig gestreut, absorbiert und transmittiert. Dabei wird die Summe aus Streuung (*scattering*) – einschließlich Beugung (*diffraction*), Brechung bzw. Refraktion (*refraction*) und Reflexion (*reflection*) – und Absorption (*absorption*) als Extinktion (*extinction*) bezeichnet. Sie beschreibt die Dämpfung der Strahlung; der verbleibende Teil ist die Transmission (*transmission*). Diese Prozesse sind von der Wellenlänge der Strahlung, den geometrischen Verhältnissen sowie dem Material abhängig. In der Fernerkundung ist die Strahlungsquelle meist die Sonne, und der an einer untersuchten (Planeten-)Oberfläche reflektierte Strahlungsanteil wird von Sensoren wie dem Zeilen-scanner HRSC erfasst. Bei der Bildaufnahme durch die Atmosphäre, wie im Fall des Mars, treten ebenfalls die oben genannten Prozesse auf und beeinflussen die Signale.

Um anhand dieser Beobachtungen auf die Beschaffenheit der Oberfläche zurückschließen zu können, ist es notwendig, die Einflussparameter bei der Bildentstehung unter Kenntnis der Strahlungseigenschaften und Sensorgeometrie geeignet zu modellieren. Des Weiteren müssen Oberflächen- und Atmosphären-einflüsse getrennt werden. Für die Ableitung von Materialeigenschaften aus richtungsabhängiger Reflexion ist eine Reihe von (teils empirischen) Reflexionsmodellen entwickelt worden.

Nachfolgend wird die Entstehung der Messwerte beschrieben. Aufbauend auf die geometrischen und physikalischen Größen der Strahlungsmessung (Radiometrie) werden Reflexionsprozesse, d.h. grundlegende Reflektanz- und Albedobegriffe, und schließlich einige in der Planetenforschung verwendete Reflexionsmodelle erläutert. Aufgrund seiner detaillierten und vor allem physikalisch interpretierbaren Parametrisierung steht dabei das Modell von Hapke im Vordergrund.

Es sei angemerkt, dass insbesondere für die Computergraphik eine Reihe von Reflexionsmodellen entwickelt wurde, um möglichst realistische Objektansichten zu erzeugen. Diese Modelle setzen sich zumeist aus diffusen und spiegelnden Anteilen zusammen. Während ein solcher Ansatz beispielsweise für photogrammetrische Nahbereichsanwendungen zweckmäßig sein kann (vgl. WROBEL 1989, WEISENSEE 1992), erscheint er zur Beschreibung von Planetenoberflächen und damit für diese Arbeit eher ungeeignet, da praktisch keine spiegelnde Reflexion auftritt und andere Effekte wiederum nicht bzw. nicht explizit modelliert sind.

3.1 Nomenklatur

Die definierten bzw. gebräuchlichen Bezeichnungen für verschiedene radiometrische Größen sowie die zugehörigen Formelzeichen haben sich im Laufe der Zeit weiterentwickelt und dabei vielfach geändert (vgl. z.B. GERSHUN 1939, NICODEMUS 1965, JUDD 1967, NICODEMUS 1970, NICODEMUS et al. 1977, MARTONCHIK et al. 2000, DIN 5031-1). In vielen Publikationen sind die verwendeten Größen ungenau spezifiziert oder weichen von existierenden Festlegungen ab, was zu Inkonsistenzen und Missverständnissen führt. Bis heute besteht ein Bedarf an eindeutigen, umfassenden und allgemeingültigen Definitionen (MARTONCHIK et al. 2000, SCHAEPMAN-STRUB et al. 2004). Weitgehend anerkannt ist die vom *National Bureau of Standards* ausgearbeitete Nomenklatur (JUDD 1967, NICODEMUS et al. 1977), welche im Wesentlichen mit CIE- bzw. ISO-Standards (vgl. JUDD 1967) sowie den DIN-Normen 5031-1 und 5036-1 übereinstimmt. Sie ist in der Physik (KUCHLING 2004), Computer Vision (HAUßBECKER 1999) sowie in der Fernerkundung bzw. Radiometrie (LESTER et al. 1979, KRAUS & SCHNEIDER 1988, MARTONCHIK et al. 2000, ALBERTZ 2007, ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2009) weit verbreitet und findet daher auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung. Die dennoch unvermeidlichen Abweichungen werden an entsprechender Stelle erläutert.

Es sei besonders darauf hingewiesen, dass die Bezeichnungen und Notationen von CHANDRASEKHAR (1960) und HAPKE (1981-2008) bzw. HAPKE & WELLS (1981) – die Quellen zur Herleitung und Weiterentwicklung des hier verwendeten Reflexionsmodells – teilweise von dieser Vereinbarung abweichen.

3.2 Vorgänge bei der Bildentstehung

Die von einer Strahlungsquelle wie der Sonne (die aufgrund ihrer Entfernung als punktförmig betrachtet wird) ausgesandte Strahlung wird auf dem Weg durch die Atmosphäre teilweise absorbiert und gestreut. Daher setzt sich die auf die Oberfläche treffende Globalstrahlung aus gerichteten (direkten) und diffusen Anteilen zusammen. Der diffuse Anteil wird als Himmelsstrahlung bezeichnet und kann auf dem Mars etwa 20% bis 40% der Globalstrahlung ausmachen (HOEKZEMA et al. 2009). Abhängig von der Wellenlänge der Strahlung, der Oberflächenstruktur und den Materialeigenschaften wird einfallende Strahlung in Richtung des Sensors reflektiert, wobei diese wiederum die Atmosphäre durchläuft und zum Teil absorbiert und gestreut wird. Ein Teil der in der Atmosphäre gestreuten Strahlung erreicht den Sensor als Luftlicht (Abbildung 3.1). Die Entstehung von Messwerten in einer Kamera ist beispielsweise bei SIEVERS (1976), KRAUS & SCHNEIDER (1988), ALBERTZ (2007) sowie mit dem Ziel der Modellierung für das Facetten-Stereosehen bei WEISENSEE (1988) und WROBEL (1989) erläutert.

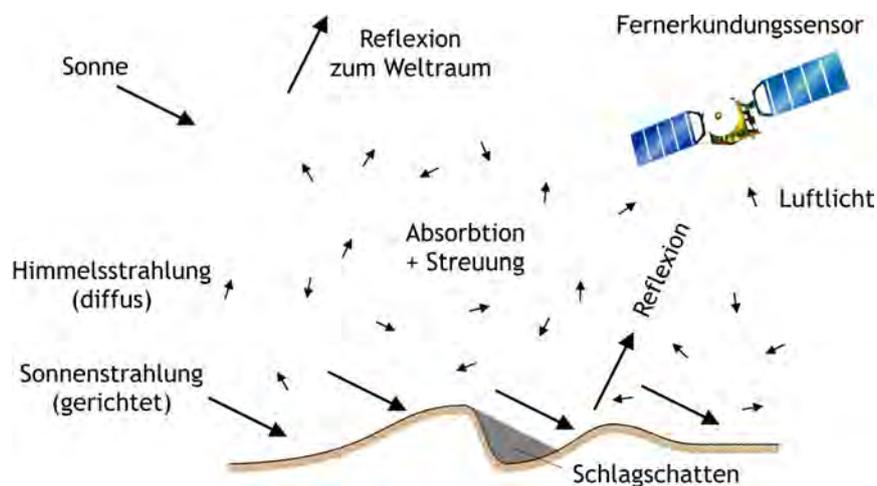


Abbildung 3.1: Strahlungsverhältnisse bei der Bildaufnahme, nach ALBERTZ (2007).

In der Kamera detektierte Strahlung beinhaltet also von der Oberfläche reflektierte und in der Atmosphäre gestreute Anteile, wobei letztere nicht bildformend sind. Zudem wird Strahlung sowohl in der Atmosphäre als auch durch die Kameraoptik gedämpft. Da die Kameraeinflüsse bei der radiometrischen Korrektur der HRSC-Daten eliminiert werden, setzen sich die Reflexionsfaktoren R_{HRSC} aus Oberflächen- und Atmosphärenanteilen zusammen. Die von der Mars-Oberfläche in Richtung des Sensors reflektierte Strahlung sei durch den Reflexionsfaktor R_{Mars} beschrieben, welcher einen Albedofaktor A beinhaltet und, je nach seiner Parametrisierung entsprechend Abschnitt 3.6, eine Funktion der Bestrahlungsrichtung θ_i und der Beobachtungsrichtung θ_r ist (vgl. Abbildung 3.3) sowie Materialeigenschaften modelliert. Beim Atmosphärendurchgang wird diese Strahlung in Abhängigkeit von der optischen Dichte (*optical depth*) τ^5 sowie der Beobachtungsrichtung $\theta_{r(\text{Niveau})}$ gegenüber der Niveaufläche gedämpft. Zusätzlich fällt in der

⁵ Es sei angemerkt, dass teils statt der optischen Dichte der Transmissionsgrad der Atmosphäre als τ bezeichnet wird. Der Transmissionsgrad entspricht dem aus der optischen Dichte bestimmbareren Dämpfungsfaktor in Gleichung (3.1).

Atmosphäre gestreutes Luftlicht (*atmospheric haze*) in die Kamera, welches eine Aufhellung des detektierten Reflexionsfaktors um den Anteil ΔR_A bewirkt. Dies lässt sich wie folgt formulieren:

$$R_{\text{HRSC}} = A f(\theta_i, \theta_r, \text{Material}) \exp\left(-\frac{\tau}{\cos \theta_{r(\text{Niveau})}}\right) + \Delta R_A = R_{\text{Mars}} \exp\left(-\frac{\tau}{\cos \theta_{r(\text{Niveau})}}\right) + \Delta R_A \quad (3.1)$$

Diese Zerlegung in additive und multiplikative Atmosphäreneinflüsse ist bewährt und wird auch hier verwendet mit dem Ziel, die Atmosphäre so weit wie nötig und dabei möglichst robust zu modellieren. Theoretisch wäre eine detailliertere Modellierung denkbar: Beispielsweise könnten der Anteil von in der Atmosphäre gestreuter Strahlung, welcher die Oberfläche erreicht und diffus bestrahlt, explizit formuliert sowie die auf dem Weg von der Oberfläche zum Sensor mehrfach gestreute Strahlung, die zu Unschärfe (*blurring*) führt, durch weitere Parameter separat ausgedrückt werden (siehe dazu MARTONCHIK et al. 1998). Letztere ist in der obigen Gleichung zumindest teilweise im Term ΔR_A enthalten, der damit alle additiven Störeinflüsse zusammenfasst. Er ist ohnehin nicht ausschließlich als Atmosphäreneigenschaft zu interpretieren, da der Luftlichtanteil auch vom Kameradesign abhängt.⁶

Die Reflexionsprozesse an der Oberfläche werden in den folgenden Teilabschnitten beschrieben.

3.3 Strahlungsphysikalische Größen

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über strahlungsphysikalische Grundgrößen, zumeist basierend auf den Definitionen von NICODEMUS et al. (1977) und DIN 5031-1, gegeben. Für eine ausführliche Erläuterung sei beispielsweise auf KUCHLING (2004), HAUBECKER (1999) oder KRAUS & SCHNEIDER (1988) verwiesen.

3.3.1 Strahlengeometrie

Die grundlegende geometrische Größe für die Beschreibung von Strahlung ist der Raumwinkel (*solid angle*) ω . Analog zum ebenen Winkel, der dem Verhältnis von Bogenlänge s und Radius r entspricht, gibt der Raumwinkel das Verhältnis einer Kugelkalotte der Fläche F zum Radiusquadrat an:

$$\omega = \frac{F}{r^2} \quad [\text{sr}] \quad (3.2)$$

Der größtmögliche, den gesamten Raum umfassende Winkel beträgt 4π sr und entspricht der Oberfläche der Einheitskugel; der Halbraum umfasst demnach 2π sr. Ist die Fläche F um einen Winkel θ gegenüber der Sichtlinie geneigt, reduziert sich der Raumwinkel entsprechend und es gilt (vgl. Abbildung 3.2):

$$\omega = \frac{F}{r^2} \cos \theta \quad [\text{sr}] \quad (3.3)$$

Das Produkt

$$\Omega = \omega \cos \theta \quad [\text{sr}] \quad (3.4)$$

wird auch als projizierter Raumwinkel bezeichnet (NICODEMUS et al. 1977) – siehe z.B. Gleichung (3.11).

⁶ Es sei angemerkt, dass bei einer detaillierten Modellbildung, welche die Streuung in der Atmosphäre und damit den „echten“ Luftlichtanteil separiert, dieser anhand eines Reflexionsmodells wie Hapke beschrieben werden kann (vgl. Abschnitt 3.6.5).

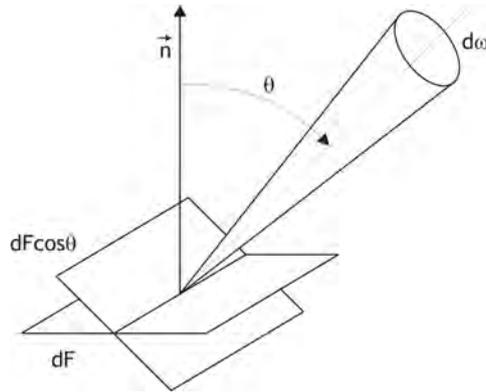


Abbildung 3.2: Geometrische Parameter zur Strahlungsbeschreibung.

3.3.2 Strahlungsenergie und -leistung

Elektromagnetische Strahlung ist grundsätzlich vorstellbar als das Strömen von Energie oder Photonen (Welle-Teilchen-Dualismus), was in verschiedene Richtungen des Raumes gleichzeitig und ohne gegenseitige Beeinflussung erfolgen kann. Die Energie e_p eines Photons ergibt sich aus der Frequenz ν bzw. – mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ – aus der Wellenlänge λ und dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$:

$$e_p = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad [\text{J}] \quad (3.5)$$

Mit der Anzahl N_p der übertragenen, ausgesendeten oder empfangenen Photonen einer Wellenlänge ergibt sich die spektrale Strahlungsenergie Q_λ und aus der Integration über den betrachteten Wellenlängenbereich die gesamte Strahlungsenergie (*radiant energy*) bzw. Strahlungsmenge Q :

$$Q = \int Q_\lambda d\lambda = \int N_p e_p d\lambda \quad [\text{J}] \quad (3.6)$$

Durch Differentiation nach der Zeit t kann die Strahlungsleistung (*radiant power*) Φ berechnet werden:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

Die Strahlungsleistung wird auch als Strahlungsfluss (*radiant flux*) bezeichnet. Sie stellt die Basisgröße in der Radiometrie dar, auf deren Grundlage im Folgenden Dichtegrößen wie der Strahlungsfluss pro Raumwinkel- und/oder Flächenelement definiert werden.

3.3.3 Strahlstärke

Die Intensität⁷ einer Strahlung wird durch die Strahlstärke (*radiant intensity*) I gekennzeichnet, welche den ausgesendeten Strahlungsfluss pro Raumwinkelelement angibt:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{sr}} \right] \quad (3.8)$$

Die Strahlstärke ist damit richtungsabhängig. Sie eignet sich zur Beschreibung punktförmiger Strahlungsquellen.

⁷ Intensität und Strahlstärke sind zwar grundsätzlich synonym, jedoch wird die Bezeichnung Intensität auch für andere strahlungsphysikalische Dichtegrößen verwendet und ist damit mehrdeutig.

3.3.4 Spezifische Ausstrahlung und Bestrahlungsstärke

Der Strahlungsfluss pro Flächeneinheit wird zur Beschreibung einer Strahlungsquelle als spezifische Ausstrahlung (*radiant exitance, radiosity*)

$$M = \frac{d\Phi}{dF} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.9)$$

und am Empfänger als Bestrahlungsstärke (*irradiance*)

$$E = \frac{d\Phi}{dF} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.10)$$

definiert. Beide Größen sind physikalisch identisch; sie sind ortsabhängig und definieren jeweils die in den gesamten Halbraum abgestrahlte bzw. die aus dem gesamten Halbraum empfangene Flussdichte.

3.3.5 Strahldichte

Die Strahldichte (*radiance*) L ist eine sowohl orts- als auch richtungsabhängige Größe; sie gibt den Strahlungsfluss im Raumwinkelement und pro Flächeneinheit an:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dF \cos\theta} \quad \left[\frac{W}{sr \cdot m^2} \right] \quad (3.11)$$

Die Strahldichte stellt eine zentrale Größe dar, da sich sämtliche strahlungsphysikalische Größen aus der entsprechenden Integration der Strahldichte ableiten lassen, wie in Tabelle 3.1 dargestellt. Die fundamentalen Untersuchungen zum Strahlungstransport (*radiative transfer*) von CHANDRASEKHAR (1960) basieren auf der Strahldichte.

3.3.6 Übersicht der radiometrischen Größen

In der Tabelle 3.1 sind die wichtigsten strahlungsphysikalischen Größen einschließlich ihrer Berechnung auf Basis der Strahldichte zusammengefasst, wobei die ersten fünf der (Aus-)Strahlung, d.h. dem Sender, und die letzten zwei einem Empfänger zuzuordnen sind. Die angegebenen Größen sind energiebasiert auf der Einheit Joule [J]. Alternativ lassen sich diese auch über die Photonenzahl N_P als Photonfluss Φ_P usw. definieren, was für die Strahlungsmessung mit Photonendetektoren zweckmäßig sein kann (HAUB-ECKER 1999). Dabei ist zu beachten, dass die Photonenenergie e_P nach Gleichung (3.5) und damit auch die Transformation zwischen den energie- und photonenbasierten Größen von der Wellenlänge abhängen. Dies ist in Tabelle 3.1 durch die Berechnung der Gesamtenergie Q als Integration der spektralen (monochromatischen) Strahlungsenergien Q_λ über den betrachteten Wellenlängenbereich verdeutlicht. Umgekehrt können aus den Größen in der Tabelle jeweils die spektralen Größen durch Differentiation nach der Wellenlänge berechnet werden.

Analog zu den strahlungsphysikalischen Größen (*radiant* ~) sind photometrische Größen der Lichttechnik (*luminant* ~) definiert, die sich ausschließlich auf den Bereich des sichtbaren Lichts (ca. 380 bis 780 nm) beziehen. In diesem Rahmen wird darauf nicht näher eingegangen und auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (z.B. GERSHUN 1939, DIN 5031-3).

Tabelle 3.1: Radiometrische Größen nach DIN 5031-1 und NICODEMUS et al. (1977).

Radiometrische Größe	Berechnung	Einheit
Strahlungsenergie, Strahlungsmenge <i>Radiant Energy</i>	$Q = \int Q_\lambda d\lambda$	$[J] = [Ws]$
Strahlungsfluss, Strahlungsleistung <i>Radiant Flux, Radiant Power</i>	$\Phi = \iint L \cos \theta d\omega dF$	$[W]$
Strahlstärke (Intensität) <i>Radiant Intensity</i>	$I = \int L \cos \theta dF$	$\left[\frac{W}{sr} \right]$
Strahldichte <i>Radiance</i>	L	$\left[\frac{W}{sr \cdot m^2} \right]$
Spezifische Ausstrahlung <i>Radiant Exitance, Radiosity</i>	$M = \int L \cos \theta d\omega$	$\left[\frac{W}{m^2} \right]$
Bestrahlungsstärke <i>Irradiance</i>	$E = \int L \cos \theta d\omega$	$\left[\frac{W}{m^2} \right]$
Bestrahlung <i>Irradiation</i>	$H = \int E dt$	$\left[\frac{J}{m^2} \right] = \left[\frac{Ws}{m^2} \right]$

3.4 Reflexion

Wenn Strahlung auf ein Medium fällt, wird diese von ihm in Teilen absorbiert, transmittiert oder gestreut. Dabei setzt sich die Streuung aus Reflexion, Brechung (Refraktion) und Beugung zusammen. Die von einer Oberfläche zurück gestreute Strahlung wird mit Methoden der Fernerkundung, z.B. durch die Sensoren der HRSC, erfasst und ist Gegenstand der weiteren Betrachtungen. Während dabei die Streuprozesse beim Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre nicht vernachlässigt werden dürfen, spielt die Strahlungsemission von der Mars-Oberfläche oder aus dessen Atmosphäre im Spektralbereich der HRSC keine Rolle.

In der Praxis werden die Begriffe Streuung und Reflexion oft synonym gebraucht, Brechung und Beugung also vernachlässigt. Die beschreibenden Gesetze heißen Reflexionsgesetze. Im Folgenden werden die Reflexionsfunktion (*bidirectional reflectance distribution function*, BRDF) als grundlegende Materialeigenschaft sowie der Reflexionsgrad und der Reflexionsfaktor im Allgemeinen definiert. Diese Größen sind von der Strahlengeometrie, d.h. sowohl von der Einfalls- und Reflexionsrichtung als auch von den jeweils betrachteten Raumwinkeln (Kollimation), abhängig. Ein Spezialfall ist der Reflexionsfaktor RADF, welcher als Messgröße der HRSC von besonderer Bedeutung ist.

3.4.1 Reflexionsgeometrie

Reflexionsprozesse werden von der Geometrie der einfallenden Strahlung (*incident radiation*, Index i) und der reflektierten Strahlung (*reflected radiation*, Index r) beeinflusst, die grundsätzlich anhand von Polarkoordinaten beschrieben werden (Abbildung 3.3).

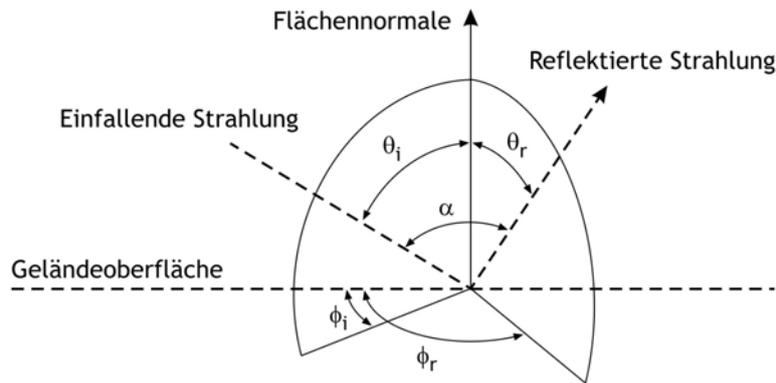


Abbildung 3.3: Geometrie einfallender und reflektierter Strahlung.

Der Winkel zwischen der einfallenden und der reflektierten Strahlung wird in Anlehnung an Mond-Beobachtungen, bei denen dieser die Richtungs-differenz zwischen Sonne und Erde angibt (Mondphase), als Phasenwinkel (*phase angle*) α ⁸ bezeichnet. Er lässt sich mittels sphärischer Geometrie aus den Azimutal- und Zenitwinkeln berechnen:

$$\cos \alpha = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\phi_r - \phi_i) \quad (3.12)$$

Sowohl die einfallende als auch die reflektierte Strahlung müssen über die jeweiligen Raumwinkel ω_i und ω_r betrachtet werden. Grenzfälle sind dabei die in eine Richtung (ϕ_r, θ_r) reflektierte Strahlung bzw. deren Anteil innerhalb des Raumwinkelelements $d\omega \rightarrow 0$ sr einerseits (vgl. Abbildung 3.2) sowie der gesamte Halbraum mit $\omega = 2\pi$ sr andererseits. Der Grad der Kollimation wird entweder als gerichtet (*directional*: ϕ_r, θ_r), konisch (*conical*: ω) oder halbräumlich (*hemispherical*: 2π) bezeichnet, wobei sich der erste und der letzte Fall aus dem konischen Allgemeinfall ableiten lassen. Diese drei Adjektive sollten – jeweils für die einfallende und die reflektierte Strahlung – den verschiedenen Reflektanzbezeichnungen vorangestellt werden, um sie anhand der betrachteten Raumwinkelkombinationen eindeutig zu charakterisieren. So ergeben sich neun verschiedene Reflexionsgeometrien (JUDD 1967, NICODEMUS et al. 1977).

3.4.2 Reflexionsfunktion (BRDF)

Die Reflexionsfunktion (BRDF) f_r nach NICODEMUS (1965, 1970) gibt, abhängig von der Bestrahlungs- und der Beobachtungsrichtung, den Zusammenhang zwischen reflektierter Strahldichte und einfallender Bestrahlungsstärke an:

$$f_r = \frac{dL_r}{dE_i} = \frac{dL_r}{L_i \cos \theta_i d\omega_i} \quad \left[\frac{1}{\text{sr}} \right] \quad (3.13)$$

Das Konzept der BRDF ermöglicht die eindeutige und vollständige Beschreibung des Reflexionsverhaltens einer Oberfläche. Sie ist eine grundlegende Materialeigenschaft und wird als Kernfunktion zur Definition von Reflektanzgrößen verwendet. Als Dichtefunktion (Reflexion pro Einheitsraumwinkel) kann sie auch Werte $f_r > 1$ annehmen.

⁸ Der Phasenwinkel wird in der Literatur häufig mit g , seltener mit α benannt; eine eindeutige Definition existiert nicht. In Konsistenz mit der Verwendung griechischer Buchstaben für Winkelgrößen wird hier die letztere Bezeichnung gebraucht.

3.4.3 Reflexionsgrade und Reflexionsfaktoren

Der Reflexionsgrad (*reflectance*) ρ entspricht dem Verhältnis des reflektierten Strahlungsanteils zur einfallenden Strahlung. Aufgrund der Energieerhaltung liegt der Wertebereich zwischen 0, was einer vollständigen Absorption entspricht, und 1 für die Totalreflexion. Der Reflexionsgrad wird üblicherweise als Quotient der Strahlungsflüsse formuliert:

$$\rho = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} \quad (3.14)$$

Anhand der Kollimation der einfallenden und reflektierten Strahlung können Reflexionsgrade für unterschiedliche Geometrien definiert werden.⁹ Der Allgemeinfall – der bikonische Reflexionsgrad $\rho(\omega_i; \omega_r)$ – lässt sich unter Formulierung der Strahlungsflüsse als Integrale der Strahldichten und unter Verwendung der in Gleichung (3.13) definierten BRDF wie folgt darstellen (NICODEMUS et al. 1977):

$$\rho(\omega_i; \omega_r) = \frac{dF \iint f_r L_i \cos \theta_i \cos \theta_r d\omega_i d\omega_r}{dF \int L_i \cos \theta_i d\omega_i} = \frac{1}{\cos \theta_i \omega_i} \iint f_r \cos \theta_i \cos \theta_r d\omega_r d\omega_i \quad (3.15)$$

Der Reflexionsfaktor (*reflectance factor*) R gibt die Reflexion relativ zu einem idealen (verlustfreien), diffus reflektierenden (Lambertschen) Material bei identischer Strahlengeometrie an:

$$R = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_r^{\text{ideal}}} = \frac{\rho}{\rho^{\text{ideal}}} \quad (3.16)$$

Ein ideal diffuses Material ist praktisch nur näherungsweise realisierbar, beispielsweise durch mehrere Schichten von „Eastman Kodak White Reflectance Paint“ (HAPKE & WELLS 1981). Dennoch liegt der große Vorteil des Reflexionsfaktors gegenüber dem Reflexionsgrad darin, dass seine Bestimmung keine vollständige Erfassung der Strahlengeometrie erfordert: Bei Labormessungen (z.B. zur Kamerakalibrierung) werden Untersuchungsgegenstand und Referenzmaterial einfach unter identischen Bedingungen beobachtet und die Messergebnisse ins Verhältnis gesetzt.

Um den Reflexionsfaktor analog zu (3.15) angeben zu können, wird die BRDF eines idealen Lambertschen Reflektors benötigt. Integriert man dazu die einfallende Strahldichte über den Halbraum HR (vgl. Tabelle 3.1), ergeben sich die Bestrahlungsstärke

$$E_i = \int_{\text{HR}} L_i \cos \theta_i d\omega_i = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i = \pi L_i \quad (3.17)$$

und nach (3.13) die BRDF einer ideal diffusen Reflexion, d.h. $L_i = L_r$:

$$f_r^{\text{ideal}} = \frac{1}{\pi} \quad (3.18)$$

Mit den Gleichungen (3.15) und (3.18) lässt sich nun der allgemeine, bikonische Reflexionsfaktor angeben:

$$R(\omega_i; \omega_r) = \frac{\iint f_r L_i \cos \theta_i \cos \theta_r d\omega_i d\omega_r}{\frac{1}{\pi} \iint L_i \cos \theta_i \cos \theta_r d\omega_i d\omega_r} = \frac{\pi}{\cos \theta_i \cos \theta_r \omega_i \omega_r} \iint f_r \cos \theta_i \cos \theta_r d\omega_r d\omega_i \quad (3.19)$$

⁹ Die Definitionen der Begriffe Reflexionsgrad und Reflexionsfaktor nach JUDD (1967) bzw. DIN 5036-1 implizieren zum Teil bestimmte Strahlengeometrien. An dieser Stelle sollen die Bezeichnungen jedoch in Anlehnung an NICODEMUS et al. (1977) allgemein gültig entsprechend ihrer physikalischen Bedeutungen verwendet werden – zur eindeutigen Kennzeichnung einer konkreten Geometrie wäre diese zusätzlich anzugeben (siehe 3.4.1).

Wird unabhängig von der Geometrie der einfallenden Strahlung die Reflexion in den gesamten Halbraum ($\omega_r = 2\pi$) betrachtet, geht der Reflexionsfaktor in den Reflexionsgrad über. In diesem Fall gilt für den vollständig diffusen Reflexionsgrad $\rho^{\text{ideal}} = 1$. Für einige geometrische Fälle des Reflexionsgrades bzw. -faktors existieren eigenständige Bezeichnungen wie beispielsweise der Strahldichtefaktor (*radiance factor*) β nach DIN 5036-1 und NICODEMUS et al. (1977) für den bidirektionalen Reflexionsgrad $R(\phi_i, \theta_i; \phi_r, \theta_r)$.

3.4.4 Reflexionsfaktor RADF

In Analogie zum Strahldichtefaktor führt HAPKE (1981, 1993) den bidirektionalen Reflexionsfaktor RADF (Kürzel für „*radiance factor*“¹⁰) ein, wobei der Unterschied zum Strahldichtefaktor nach DIN 5036-1 und NICODEMUS et al. (1977) darin besteht, dass das ideale Referenzmaterial nicht im selben Winkel wie das Objekt sondern in einer fest definierten Richtung – im Fall der HRSC auf *Mars Express* senkrecht – bestrahlt wird. Ein derartig definierter Reflexionsgrad ist von praktischem Vorteil, da für die Ableitung des „echten“ Strahldichtefaktors aus einer gemessenen Bildintensität die Bestrahlungsrichtungen sowohl für das Objekt als auch für das Referenzmaterial bekannt sein müssten, um entsprechend Gleichung (3.16) das Verhältnis der Reflexionsgrade zu berechnen. Neben der Kamerakalibrierung gegenüber eines aus allen Richtungen bestrahlten Referenzmaterials müssten also auch lokale Oberflächennormalen, d.h. ein DGM, bereits vorliegen. Ein solcher Einfluss wäre sicherlich nicht nur für die gemeinsame Ableitung radiometrischer und geometrischer Oberflächeneigenschaften innerhalb dieser Arbeit von Nachteil.

In der planetaren Radiometrie wird allgemein der Reflektanzbegriff „I/F“ verwendet. Dieser lässt sich auf die frühere Bezeichnung der (reflektierten) Strahldichte als *intensity* I und auf den ankommenden *flux* F nach CHANDRASEKHAR (1960) zurückführen und entspricht damit grundsätzlich einem bidirektionalen Reflexionsfaktor. Er kann allerdings in einzelnen Missionen unterschiedlich interpretiert werden, wenn beispielsweise Strahlengometrien verschieden definiert sind. Für die HRSC gilt nach JAUMANN et al. (2007):

$$\frac{I}{F} = \text{RADF} = R(\dots) = \frac{\rho(\phi_i, \theta_i; \phi_r, \theta_r)}{\rho^{\text{ideal}}(0; \phi_r, \theta_r)} = \frac{\rho(\phi_i, \theta_i; \phi_r, \theta_r)}{\rho^{\text{ideal}}(\phi_i, \theta_i; \phi_r, \theta_r)} \cos \phi_i = R(\phi_i, \theta_i; \phi_r, \theta_r) \cos \phi_i = \beta \cos \phi_i \quad (3.20)$$

Der RADF wird im Rahmen dieser Arbeit als Beobachtungsgröße der HRSC aufgefasst und mit R, ohne Angabe der Reflexionsgeometrie¹¹, bezeichnet. Da die nachfolgenden Berechnungsformeln ausschließlich in Abhängigkeit von R formuliert werden, sollten Verwechslungen ausgeschlossen sein.

3.4.5 Albedo

Die Albedo (von lat. *weiß*) A gibt das Rückstreuvermögen einer Oberfläche an, d.h. das Verhältnis der gesamten reflektierten Strahlung zur insgesamt einfallenden Strahlung; sie wird also über den gesamten Halbraum betrachtet und entspricht dem bihemisphärischen Reflexionsgrad:

$$A = \rho(2\pi; 2\pi) \quad (3.21)$$

Eine so definierte Albedo ist von der räumlichen Verteilung der einfallenden Strahlung abhängig und damit uneindeutig (SIEVERS 1976).

¹⁰ Der Strahldichtefaktor selbst wird von HAPKE nicht als *radiance factor* sondern als *radiance coefficient* (1981) oder allgemein als *bidirectional reflectance factor* (1993) bezeichnet.

¹¹ Dazu sei angemerkt, dass die Angabe der Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie entsprechend dem Konzept von NICODEMUS et al. (1977) auch gar nicht möglich wäre, da sie sich zwischen Referenzmaterial und Untersuchungsobjekt unterscheidet.

In der Praxis werden die Bezeichnungen Reflexionsgrad, (bihemisphärische) Reflektanz, Reflexionsvermögen und Albedo weitgehend synonym gebraucht. Daneben existieren andere Albedodefinitionen, die auf unterschiedlichen Reflexionsgeometrien beruhen (siehe KRAUS & SCHNEIDER 1988, HAPKE 1993 oder MARTONCHIK et al. 2000). In der Formulierung von Reflexionsmodellen wird teilweise die Normalalbedo (*normal albedo*) A_N verwendet. Sie entspricht dem Reflexionsfaktor unter senkrechter Bestrahlung ($\theta_i = 0^\circ$) und Beobachtung ($\theta_r = 0^\circ$):

$$A_N = R(0;0) = \frac{\rho(0;0)}{\rho^{\text{ideal}}(0;0)} \quad (3.22)$$

Eine Albedo ist elementarer Bestandteil jedes Reflexionsmodells. Aufgrund unterschiedlicher Abstraktionsgrade sind in der Praxis bestimmte Werte jedoch nur bedingt vergleichbar.

3.5 Parametrisierung von Oberflächen- und Materialeigenschaften

Eine beliebige Oberfläche wird grundsätzlich durch ihre Helligkeit, d.h. durch einen Albedoparameter, charakterisiert. Eine detaillierte radiometrische Beschreibung basiert auf den optischen Eigenschaften der Einzelteilchen sowie auf dem Zusammenspiel dieser Teilchen, also auf der Struktur der oberflächennahen Schichten (Volumenstreuung). Die Richtungsabhängigkeit der Reflexion wird einerseits durch die Transparenz der Teilchen und andererseits durch die Oberflächenform in verschiedenen Maßstabebenen bestimmt – von der mikroskopischen Textur bzw. Körnigkeit über die makroskopische Rauigkeit bis zur großmaßstäbigen Topographie.

Photometrische Gesetze unterscheiden sich in der Modellierung der Strahlengeometrie (und damit auch der Berücksichtigung der Topographie), vor allem aber in der Anzahl weiterer Parameter, welche die aus Materialeigenschaften resultierende Anisotropie der Reflexion, die Rückstreuung (Oppositionseffekt) sowie die Oberflächenrauigkeit beschreiben. Dabei haben insbesondere planetare Reflexionsmodelle empirischen oder semi-empirischen Charakter. Eine vollständig exakte Modellierung des Reflexionsverhaltens ist besonders in der Fernerkundung aufgrund der begrenzten geometrischen und radiometrischen Auflösung nicht möglich und in ihrer Komplexität auch nicht handhabbar, zumal über die Oberfläche (Teilchengrößen, -formen und -zusammensetzung) vielfach nur Annahmen gemacht werden können. Im Vordergrund steht also nicht die mathematisch exakte Modellbildung, sondern vielmehr die praktische Anwendbarkeit mit dem Ziel einer signifikanten Beschreibung des Reflexionsverhaltens. Die einzelnen Modellparameter sind dabei jedoch zumeist physikalisch motiviert und lassen dementsprechend Rückschlüsse auf die Oberflächen- und Materialeigenschaften zu.

Im Folgenden sind diese Eigenschaften und die daraus resultierenden photometrischen Effekte anhand des Reflexionsmodells von Hapke (Abschnitt 3.6.5) umfassend beschrieben. Andere, einfachere Modelle basieren auf einem Teil dieser Parameter.

3.5.1 Albedo

Nahezu alle Reflexionsmodelle beinhalten die Albedo oder einen strahlungsphysikalisch vergleichbaren Parameter wie beispielsweise die Teilchenalbedo (siehe nachfolgenden Abschnitt) als Proportionalitätskonstante. Je nach Modell spiegeln sich in dieser Albedo allerdings unterschiedliche geometrie- und/oder materialabhängige Effekte wider, welche nicht durch andere Parameter modelliert sind, insbesondere wenn sie – wie beispielsweise im Lambert- oder Lommel-Seeliger-Modell – den einzigen Freiheitsgrad darstellt. Eine solche Albedo ist modellabhängig. Darüber hinaus kann sie auch nicht als konstant über den Halbraum angesehen werden. Sie ist vielmehr eine Funktion der Strahlengeometrie (Phasenwinkel). Aufgrund dessen sind die aus verschiedenen Reflexionsmodellen bestimmbaren Werte nur bedingt vergleichbar oder ineinander transformierbar.

3.5.2 Teilchenalbedo und Mehrfachstreuung

Im Gegensatz zu einer Albedo, welche die Oberfläche in ihrer Gesamtheit beschreibt, ermöglicht das Konzept der Teilchenalbedo (*particle single-scattering albedo*) nach CHANDRASEKHAR (1960) eine detailliertere Modellbildung. Die Teilchenalbedo w gibt den gestreuten Anteil der mit einem einzigen Partikel wechselwirkenden, d.h. sowohl absorbierten als auch gestreuten, Strahlung an und kann mittels der wirksamen Streu- und Absorptionsquerschnitte σ_S und σ_A oder anhand der betreffenden Strahlungsflüsse Φ_S und Φ_A dargestellt werden (HAPKE 1993):

$$w = \frac{\sigma_S}{\sigma_S + \sigma_A} = \frac{\Phi_S}{\Phi_S + \Phi_A} \quad (3.23)$$

Die effektiven Querschnitte, die nach Gleichung (3.10) als Verhältnisse der entsprechenden Strahlungsflüsse zur Bestrahlungsstärke, d.h. als

$$\sigma_{S,A} = \frac{\Phi_{S,A}}{E} \quad [\text{m}^2], \quad (3.24)$$

definiert sind, beschreiben wirkliche flächenhafte Größen.

Die Teilchenalbedo ist eine echte Materialeigenschaft und kann daher als fundamentale Albedogröße angesehen werden, aus der andere ableitbar sind. Zwischen der Teilchenalbedo w und einer diffusen (Oberflächen-)Albedo A als Summe aller einzelnen Streuprozesse besteht folgender Zusammenhang (HAPKE 1993):

$$w = \frac{4A}{(1+A)^2} \quad (3.25)$$

$$A = \frac{1 - \sqrt{1-w}}{1 + \sqrt{1-w}} = \frac{1}{4}w + \frac{1}{8}w^2 + \frac{5}{64}w^3 + \dots \quad (3.26)$$

Der erste, lineare Term in der Reihenentwicklung gibt den Anteil aus einmal gestreuter, der quadratische Term den aus zweimal gestreuter Strahlung usw. an. Die Mehrfachstreuung kann in Reflexionsmodellen, welche auf der Teilchenalbedo statt auf einer allgemeinen Oberflächenalbedo als Proportionalitätsfaktor basieren, gesondert berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit dazu sind die so genannten H-Funktionen, die sich als exakte Lösung der Strahlungstransportgleichung unter Annahme isotroper Streuung folgendermaßen berechnen lassen (CHANDRASEKHAR 1960):

$$H(\theta_{i,r}) = 1 + \frac{w}{2} \cos \theta_{i,r} H(\theta_{i,r}) \int_0^{\pi/2} \frac{H(\theta'_{i,r})}{\cos \theta_{i,r} + \cos \theta'_{i,r}} d\theta'_{i,r} \quad (3.27)$$

Diese Integraldarstellung kann nur numerisch gelöst werden. In der Praxis sind die von HAPKE (1981 bzw. 2002) vorgeschlagenen Näherungen

$$H(\theta_{i,r}) \approx \frac{1 + 2 \cos \theta_{i,r}}{1 + 2 \cos \theta_{i,r} \sqrt{1-w}} \quad (3.28)$$

oder, unter Verwendung der durch (3.26) definierten diffusen Albedo A ,

$$H(\theta_{i,r}) \approx \left[1 - w \cos \theta_{i,r} \left(A + \frac{1 - 2A \cos \theta_{i,r}}{2} \ln \frac{1 + \cos \theta_{i,r}}{\cos \theta_{i,r}} \right) \right]^{-1} \quad (3.29)$$

gebräuchlich; sie liefern die H-Funktion mit Genauigkeiten von unter 4% bzw. unter 1%. In bidirektionalen Reflexionsmodellen wie beispielsweise Hapke (Abschnitt 3.6.5) wird die Mehrfachstreuung $M(\theta_i, \theta_r)$

durch H-Funktionen in Abhängigkeit von der Einfallrichtung, $H(\theta_i)$, und der Beobachtungsrichtung, $H(\theta_r)$, parametrisiert:

$$M(\theta_i, \theta_r) = H(\theta_i)H(\theta_r) - 1 \quad (3.30)$$

Bei Betrachtung der Gleichungen (3.28) bzw. (3.29) wird deutlich, dass die Häufigkeit der Streuungen mit zunehmender (Teilchen-)Albedo und abnehmendem Zenitwinkel ansteigt: Während Mehrfachstreuungen für $w \rightarrow 0$ bzw. $\theta \rightarrow 90^\circ$ sehr unwahrscheinlich werden ($H \rightarrow 1$), dominiert bei $w \rightarrow 1$ und $\theta \rightarrow 0^\circ$ die Mehrfachstreuung: $H \rightarrow 2,91$ nach Gleichung (3.29).

3.5.3 Phasenfunktion

Streuungsprozesse an einzelnen Teilchen sind in der Regel nicht isotrop, d.h. einfallende Strahlung wird in verschiedene Phasenwinkel unterschiedlich stark gestreut. Selbst perfekte Kugeln weisen dabei unter anderem rückwärts als auch vorwärts gerichtete Anteile auf, die auf Grundlage der Mie-Theorie exakt beschreibbar sind (HAPKE 1993). Die Anisotropie realer Teilchen, welche in ihrer Form, Oberflächenbeschaffenheit und/oder in ihrer internen Struktur und Zusammensetzung vom sphärischen Ideal abweichen, kann nur durch eine empirische Phasenfunktion (*single particle phase function*) modelliert werden. Auch hier treten Vorwärts- und Rückwärtsstreuung in unterschiedlich starken Ausprägungen auf. Bei den meisten Partikeln planetarer Oberflächen dominiert der zurück gestreute Anteil (MCGUIRE & HAPKE 1995, HARTMANN & DOMINGUE 1998), wobei mit abnehmender Teilchengröße die Transmission und damit auch die vorwärts gerichtete Streuung zunimmt (CORD 2003, CORD et al. 2005).

Für die geeignete Modellierung sowohl von Vorwärts- als auch von Rückwärtsstreuung muss die Phasenfunktion mindestens zwei freie Parameter aufweisen, für kleine Phasenwinkelbereiche kann ein Parameter ausreichen. Die vollständig isotrope Phasenfunktion ist:

$$P(\alpha) = 1 \quad (3.31)$$

Da eine Phasenfunktion nicht den Streuungsprozess an sich, sondern lediglich dessen richtungsabhängige Verteilung beschreiben soll, muss sie normiert sein. Praktische Modellierungen basieren nahezu ausschließlich auf Legendreschen Polynomen und auf der Henyey-Greenstein-Funktion, wobei letztere die größere Bedeutung hat.

3.5.3.1 Legendresche Polynome

Eine mögliche Formulierung der Phasenfunktion basiert auf Legendreschen Polynomen zweiter Ordnung. Aufgrund der Normierung wird der konstante Term zu 1 gesetzt:

$$P_L(\alpha) = 1 + b \cos \alpha + \frac{c}{2} (3 \cos^2 \alpha - 1) \quad (3.32)$$

Für kleine Phasenwinkel kann die erste Ordnung ausreichen, z.B. für die Modellierung der Mars-Oberfläche von HERKENHOFF & MURRAY (1990). Theoretisch ist auch die dritte Ordnung denkbar (vgl. CORD 2003).

3.5.3.2 Henyey-Greenstein-Funktion

Die Phasenfunktion nach HENYEY & GREENSTEIN (1941) basiert auf der Ellipsengleichung; das beschriebene Teilchen liegt im Brennpunkt. Mit der Normierungsbedingung bleibt ein freier Parameter b , welcher die Form der Strahlungskeule beschreibt:

$$P_{HG}(\alpha) = \frac{1 - b^2}{(1 - 2b \cos \alpha + b^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.33)$$

Vorwärts- und Rückwärtsstreuung werden über einen zweiten Parameter c modelliert, der die Gewichtung zwischen zwei (gleichförmigen) Ellipsen regelt. Damit ergibt sich die Double-Henyey-Greenstein-Funktion:

$$P_{\text{HG2}}(\alpha) = c P_{\text{HG2}}(\alpha, b) + (1-c) P_{\text{HG2}}(\alpha, -b) = c \frac{1-b^2}{(1-2b \cos \alpha + b^2)^{\frac{3}{2}}} + (1-c) \frac{1-b^2}{(1+2b \cos \alpha + b^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.34)$$

Um schließlich nicht nur die Gewichtung zwischen Vorwärts- und Rückwärtsstreuung, sondern die beiden Strahlungskeulen wirklich individuell zu beschreiben, können zwei unterschiedliche Formparameter und damit insgesamt drei Freiheitsgrade eingeführt werden. Eine solche Funktion wurde beispielsweise von MCGUIRE & HAPKE (1995) und HARTMANN & DOMINGUE (1998) für die Auswertung von Laborergebnissen angewendet.

Die größte praktische Bedeutung hat jedoch die Zwei-Parameter-Funktion. Sie ermöglicht eine gute Beschreibung von Streuprozessen bei geringem Freiheitsgrad, was auch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen im Abschnitt 5.3.2 belegen. Trotz ihres empirischen Charakters ermöglichen die beiden Parameter b und c Rückschlüsse auf die Struktur der untersuchten Partikel. So zeigt beispielsweise ein transparentes, sphärisches Teilchen eine ausgeprägte Vorwärtsstreuung ($c \rightarrow 0$ und $b \rightarrow 1$) und mit zunehmend unregelmäßigerem Aufbau (raue Oberfläche, interne Streuteilchen) wird die Strahlungskeule weiter; schließlich dominiert die Rückstreuung ($c > 0,5$ und $b \rightarrow 0$). Im b - c -Diagramm nach HAPKE (1993) liegen die Parameter dann innerhalb eines L-förmigen Wertebereiches (Abbildung 3.4).

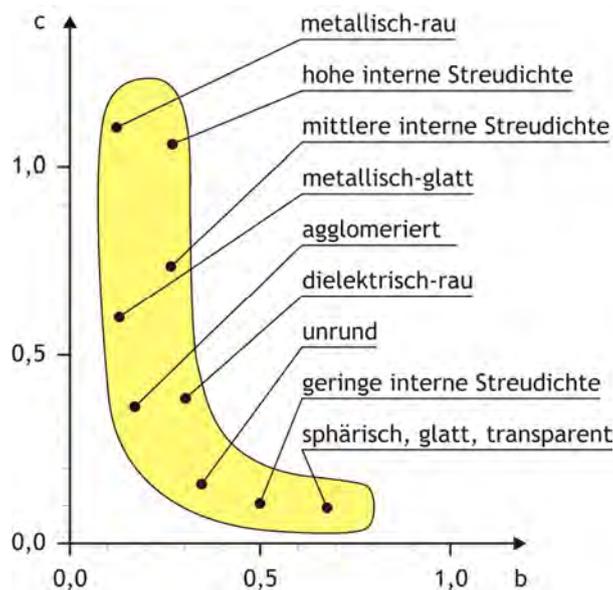


Abbildung 3.4: Rückschluss auf die Partikelstruktur anhand der Parameter b und c der Double-Henyey-Greenstein-Funktion (nach HAPKE 1993).

3.5.4 Oppositionseffekt

Der Oppositionseffekt (*opposition effect*), auch als Hot Spot oder Heiligenschein (*halo*) bezeichnet, ist ein scharfer Helligkeitsanstieg des in kleine Phasenwinkel reflektierten Lichts (Rückstreuung). Der Name leitet sich aus der astronomischen Opposition ab, bei der sich die Sonne als Strahlungsquelle, die Erde als Beobachtungsstandpunkt und der untersuchte Himmelskörper auf einer Geraden befinden und damit der Phasenwinkel $\alpha = 0^\circ$ ist. Der Effekt wurde erstmals 1887 von SEELIGER an den Saturnringen beobachtet. Er tritt an vielen festen Stoffen und damit auch auf Himmelskörpern, deren Oberfläche sichtbar ist, auf (HAPKE 1986, 1993).

3.5.4.1 Shadow-hiding (SHOE)

Eine Ursache des Oppositionseffektes ist, dass unter kleinen Phasenwinkeln bestrahlte Teilchen, die groß gegenüber der Wellenlänge der Strahlung sind, ihre eigenen Schatten verdecken (*shadow-hiding opposition effect*, SHOE) und damit die Oberfläche heller erscheint.

Grundsätzlich kann Strahlung abhängig von der Zusammensetzung der oberflächennahen Schichten in diese eindringen und nach der Streuung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auch wieder austreten (Volumenstreuung). Dieses Modell von Wahrscheinlichkeitszylindern, in denen sich Strahlung bewegt, ist die Motivation für das Lommel-Seeliger-Reflexionsgesetz (Abschnitt 3.6.2). Dabei wird allerdings die Überlappung der Ein- und Austrittszylinder, die mit kleinerem Phasenwinkel zunimmt, vernachlässigt. Bei identischer Bestrahlungs- und Beobachtungsrichtung sind auch die Zylinder identisch und ein eingedrungenes Photon kann in derselben Richtung ungehindert wieder austreten. Die Austrittswahrscheinlichkeit ist dann 1.

Die Modellierung des SHOE erfolgt über die Rückstreuungsfunktion (*backscatter function*) B_{SH} , welche die Überlappung der Wahrscheinlichkeitszylinder ausdrückt. Sie umfasst zwei Parameter: 1. die von der Korngrößenverteilung des Materials abhängige Kompaktion h_{SH} sowie 2. die Stärke bzw. Amplitude B_{SH0} des Effektes:

$$B_{SH} = 1 + B_{SH0} \frac{1}{1 + t_{SH}} \quad (3.35)$$

mit

$$t_{SH} = \frac{1}{h_{SH}} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.36)$$

Eine detaillierte Herleitung kann HAPKE (1986) entnommen werden.

Die Amplitude entspricht dem Verhältnis der an der Teilchenoberfläche zurückgestreuten Strahlung $S(\alpha=0^\circ)$ zur gesamten Rückstreuung – als Produkt der Teilchenalbedo w und der Phasenfunktion $P(\alpha=0^\circ)$ – und hängt damit von der Transparenz ab:

$$B_{SH0} = \frac{S(\alpha=0^\circ)}{wP(\alpha=0^\circ)} \quad (3.37)$$

Daraus folgt: $0 \leq B_{SH0} \leq 1$, obwohl bei der praktischen Modellierung durchaus größere Werte bestimmt werden (Übersichten in HELFENSTEIN et al. 1997 und JOHNSON et al. 2008). Die Amplitude trägt dem Umstand Rechnung, dass Ein- und Austrittspunkt der aus dem Partikelinneren zurückgestreuten Strahlung unterschiedlich sein können und sich damit auch die Austrittswahrscheinlichkeit aus der Oberflächenschicht verringert.

Wie aus obigen Formeln ersichtlich, wird die Halbweite (*half width of the half maximum*, HWHW) des SHOE, d.h. der beeinflusste Phasenwinkelbereich, durch den Kompaktionsparameter h_{SH} bestimmt. Nach HAPKE (1986, 1993) hängt dieser vom Füllfaktor (*filling factor*) F – der Volumenanteil innerhalb des Mediums, der durch feste Teilchen eingenommen wird – bzw. von der Porosität $(1-F)$ ab. Die mathematische Formulierung setzt ein Modell über die Verteilung der Korngrößen im Bereich der Radien r_{min} und r_{max} voraus. Das Regolith vieler Planetenoberflächen kann durch

$$h = -\frac{3}{8} \sqrt{3} \ln(1-F) \ln \frac{r_{min}}{r_{max}} \quad (3.38)$$

beschrieben werden. Typische Werte sind $F = 0,5$ und $r_{min}/r_{max} = 0,001$ (HAPKE 1986, 2008), woraus sich für $h_{SH} = 0,065$ ergibt (vgl. auch JOHNSON et al. 2008).

Aufgrund aktueller Untersuchungsergebnisse muss allerdings der direkte Zusammenhang zwischen h_{SH} und Porosität angezweifelt werden; die physikalische Interpretation des Parameters h_{SH} ist derzeit ungeklärt (SHEPARD & HELFENSTEIN 2007, HAPKE 2008). Siehe unteren Abschnitt 3.5.5 zur Porositätskorrektur.

3.5.4.2 Kohärente Rückstreuung (CBOE)

Ein anderer Beitrag zum Oppositionseffekt ist die kohärente Rückstreuung (*coherent backscatter opposition effect*, CBOE). Die Ursache liegt in der konstruktiven Interferenz mehrfach gestreuter Strahlung derselben Wellenfront, die innerhalb des Mediums denselben Weg in umgekehrter Richtung zurücklegt und unweit voneinander (nah im Vergleich zur Wellenlänge) austritt. Dies kann analog zum SHOE durch die Rückstrefunktion B_{CB} mit den Parametern B_{CB0} und h_{CB} beschrieben werden (HAPKE 2002):

$$B_{CB} = 1 + B_{CB0} \frac{1 + \frac{1 - e^{-t_{CB}}}{t_{CB}}}{2(1 + t_{CB})^2} \quad (3.39)$$

mit

$$t_{CB} = \frac{1}{h_{CB}} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.40)$$

Der Parameter h_{CB} ist von der Wellenlänge λ und der durchschnittlichen Strecke Λ , die ein Photon innerhalb des Mediums ohne signifikante Richtungsänderung zurücklegen kann (*transport mean free path*), abhängig:

$$h_{CB} = \frac{\lambda}{4\pi\Lambda} \quad (3.41)$$

Damit bestimmt h_{CB} analog zu h_{SH} die Halbweite des Oppositionseffektes.

3.5.5 Porosität

Reflexionsmodelle, die auf der Strahlungstransportgleichung beruhen, implizieren eine kontinuierliche Oberfläche. Das aus einzelnen Teilchen aufgebaute Regolith hat jedoch Zwischenräume mit einem von der Korngröße und der Korngrößenverteilung abhängigen Volumenanteil (Porosität), weshalb derart bestimmte Reflexionsparameter systematische Fehler aufweisen. Daher leitet HAPKE (2008) einen Korrekturfaktor K für planetare Reflexionsmodelle ab, der auf dem Füllfaktor F basiert und damit der Porosität (1-F) Rechnung trägt:

$$K(F) = \frac{-\ln \left[1 - \left(\frac{3}{4} \sqrt{\pi F} \right)^{\frac{2}{3}} \right]}{\left(\frac{3}{4} \sqrt{\pi F} \right)^{\frac{2}{3}}} \approx \frac{-\ln \left(1 - 1,209 F^{\frac{2}{3}} \right)}{1,209 F^{\frac{2}{3}}} \quad (3.42)$$

Da die Porosität auch die Mehrfachreflexion beeinflusst, müssen die H-Funktionen entsprechend erweitert werden. So wird Gleichung (3.28) zu:

$$H(\theta_{i,r}) \approx \frac{K(F) + 2 \cos \theta_{i,r}}{K(F) + 2 \cos \theta_{i,r} \sqrt{1-w}} \quad (3.43)$$

Die derart modellierte Porositätskorrektur gilt streng nur für Füllfaktoren $F < \pi/6 \approx 0,524$, da sie die darüber zunehmenden Kohärenzeffekte außer Acht lässt; siehe HAPKE (2008) für Details. Sie stellt eine

generelle Eigenschaft des Reflexionsmodells dar und ist damit insbesondere auch außerhalb des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Oppositionseffektes gültig.

3.5.6 Oberflächenrauigkeit

Natürliche Oberflächen weisen Neigungen auf, welche das Reflexionsverhalten beeinflussen. Abhängig von ihrer Art und Größenordnung werden diese in Reflexionsmodellen unterschiedlich modelliert. Die Neigungen lassen sich maßstabsabhängig in drei Gruppen einteilen:

- Die **mikroskopische Rauigkeit** oder Körnigkeit einer Oberfläche führt zu Wechselwirkungen in Form von Abschattungen und Mehrfachreflexionen zwischen Einzelteilchen bzw. Aggregaten. Diese können entsprechend der Teilabschnitte 3.5.2 und 3.5.4 berücksichtigt werden.
- Die **makroskopische Rauigkeit** liegt in ihrer Größenordnung über dem Partikeldurchmesser aber unterhalb der Sensorauflösung. Sie führt zu Schattierungen im Subpixelbereich, wobei aufgrund der fraktalen Oberflächenstruktur (vgl. Abschnitt 2.1.2) höherfrequente Anteile dominieren – etwa von der Wellenlänge der aufgezeichneten Strahlung bis zum Zentimeterbereich (HAPKE 1993, SHEPHARD & CAMPBELL 1998). Die Modellierung ist Gegenstand dieses Abschnitts.
- Die **Geländetopographie** beeinflusst die wirksamen Strahldichten. Sie ist in der Reflexionsgeometrie berücksichtigt, da sich Bestrahlungs- und Beobachtungsrichtungen auf lokale Oberflächennormalen beziehen (Abbildung 3.3), und so impliziter Bestandteil von Reflexionsmodellen.

Eine Methode zur Korrektur beliebiger Reflexionsmodelle um den Einfluss der makroskopischen Rauigkeit (*macroscopic roughness*) wurde von HAPKE (1984) entwickelt. Dabei wird die Oberfläche im Subpixelbereich als facettiert betrachtet. Die Normalen der einzelnen Facetten sind jeweils um einen Winkel θ gegenüber der lokalen Oberflächennormalen geneigt; die Rauigkeit ist der Topographie überlagert. Das Modell impliziert, dass keine bevorzugte azimutale Ausrichtung dieser Facetten vorherrscht. Die Zenitwinkel können damit als normal verteilt angesehen werden, sodass eine mittlere Neigung $\bar{\theta}$ – der einzig freie Rauigkeitsparameter¹² – unter der Annahme einer normierten Gaußschen Verteilungsfunktion $a(\theta)$ als Integral über alle Facetten der betrachteten (Pixel-)Fläche definiert werden kann (HAPKE 1984, 1993):

$$\tan \bar{\theta} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} a(\theta) \tan \theta d\theta \quad (3.44)$$

Aufgrund der Rauigkeit treten insbesondere unter flachen Bestrahlungs- und Beobachtungsrichtungen Abschattungen auf, welche zwei Ursachen haben: Zum einen werden einzelne Facetten durch andere verdeckt und befinden sich im Projektionsschatten. Zum anderen liegen Facetten, deren Normalen um mehr als 90° gegen die Bestrahlungs- bzw. Beobachtungsrichtung gekippt sind, im Neigungsschatten. Infolge dessen sind bestrahlte bzw. sichtbare Facetten tendenziell zu den Richtungen θ_i und θ_r hin geneigt. Dem wird durch die Einführung effektiver Winkel θ'_i bzw. θ'_r in ein Reflexionsmodell einer glatten Oberfläche sowie durch den Korrekturfaktor $S(\bar{\theta})$ für die makroskopische Rauigkeit Rechnung getragen.

Für die Bestimmung der effektiven Zenitwinkel sind umfangreiche geometrische Betrachtungen der Abschattungen nötig, welche im Detail HAPKE (1984, 1993) entnommen werden können. Aufgrund der unterschiedlich gearteten Überlagerungen zwischen Bestrahlungs- und Beobachtungsschatten werden dabei die beiden Fälle $\theta_i < \theta_r$ und $\theta_i > \theta_r$ separat betrachtet.

¹² Eine andere Möglichkeit zur Quantifizierung der Rauigkeit ist die Streuung von Höhen (RMS = *root mean square*) bezüglich einer Basislänge (woraus wiederum ein mittlerer Neigungswinkel berechnet werden kann). Derartige Rauigkeitsdaten wurden für die Mars-Oberfläche beispielsweise von SMITH et al. (1999) aus MOLA-Messungen abgeleitet.

3.5.6.1 Der Fall $\theta_i < \theta_r$

Die effektiven Bestrahlungs- und Beobachtungsrichtungen können unter Verwendung der Koeffizienten

$$E_1(\theta_{i,r}) = \exp\left(-\frac{2}{\pi \tan \bar{\theta} \tan \theta_{i,r}}\right), \quad (3.45)$$

$$E_2(\theta_{i,r}) = \exp\left(-\frac{1}{\pi \tan^2 \bar{\theta} \tan^2 \theta_{i,r}}\right) \text{ und} \quad (3.46)$$

$$\chi = (1 + \pi \tan^2 \bar{\theta})^{-\frac{1}{2}} \quad (3.47)$$

wie folgt berechnet werden:

$$\cos \theta_i' = \chi \left[\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \bar{\theta} \frac{E_2(\theta_r) \cos \psi + E_2(\theta_i) \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right)}{2 - E_1(\theta_r) - \left(\frac{\psi}{\pi}\right) E_1(\theta_i)} \right] \quad (3.48)$$

$$\cos \theta_r' = \chi \left[\cos \theta_r + \sin \theta_r \tan \bar{\theta} \frac{E_2(\theta_r) - E_2(\theta_i) \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right)}{2 - E_1(\theta_r) - \left(\frac{\psi}{\pi}\right) E_1(\theta_i)} \right] \quad (3.49)$$

Für $\theta_i = \theta_r = 0^\circ$ sowie für $\theta_i = \theta_r = 90^\circ$ liefern diese Formeln exakte Ergebnisse, was insbesondere im zweiten Fall von Bedeutung ist, da unter flachen Winkeln der Einfluss der makroskopischen Rauigkeit maximal wird. Für die dazwischen liegenden Richtungen stellen die Formeln Näherungslösungen unter Annahme kleiner mittlerer Neigungen¹³ dar. Es werden nur Potenzen von $\bar{\theta} \leq 2$ betrachtet, vgl. E_1 und E_2 .

Für identische Azimute der Bestrahlungs- und Beobachtungsrichtungen ($\psi = 0^\circ$) ergeben sich die folgenden Hilfsgrößen:

$$\cos \theta_i^{i0} = \chi \left[\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \bar{\theta} \frac{E_2(\theta_i)}{2 - E_1(\theta_i)} \right] \quad (3.50)$$

$$\cos \theta_r^{i0} = \chi \left[\cos \theta_r + \sin \theta_r \tan \bar{\theta} \frac{E_2(\theta_r)}{2 - E_1(\theta_r)} \right] \quad (3.51)$$

Der Korrekturfaktor für die makroskopische Rauigkeit ist dann

$$S(\bar{\theta}) = \frac{\cos \theta_r' \cos \theta_i}{\cos \theta_r^{i0} \cos \theta_i^{i0}} \frac{\chi}{1 - f + f\chi \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i^{i0}}}, \quad (3.52)$$

wobei der empirische Parameter

¹³ HAPKE (1984) gibt im Zusammenhang mit der Formelherleitung ein Beispiel an, das auf einer mittleren Neigung von 25° basiert. In der Praxis wird anhand des Hapke-Modells das Reflexionsverhalten von Oberflächen ähnlicher Rauigkeit beschreiben (z.B. CLARK et al. 2001, CORD 2003, LEDERER et al. 2005). Die Rauigkeit des Planeten Mars liegt im Allgemeinen unter 30° (JOHNSON et al. 2008).

$$f = \exp\left(-2 \tan \frac{\Psi}{2}\right) \quad (3.53)$$

den Anteil des Bestrahlungsschattens angibt, der abhängig vom Azimut ψ innerhalb des Beobachtungsschattens liegt.

3.5.6.2 Der Fall $\theta_i > \theta_r$

Für diesen Fall ergeben sich die effektiven Richtungen unter Verwendung der (allgemein gültigen) Koeffizienten E_1 , E_2 und χ aus den der Gleichungen (3.45), (3.46) und (3.47) zu

$$\cos \theta_i' = \chi \left[\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \bar{\theta} \frac{E_2(\theta_i) - E_2(\theta_r) \sin^2\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{2 - E_1(\theta_i) - \left(\frac{\Psi}{\pi}\right) E_1(\theta_r)} \right] \quad (3.54)$$

$$\cos \theta_r' = \chi \left[\cos \theta_r + \sin \theta_r \tan \bar{\theta} \frac{E_2(\theta_i) \cos \psi + E_2(\theta_r) \sin^2\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{2 - E_1(\theta_i) - \left(\frac{\Psi}{\pi}\right) E_1(\theta_r)} \right] \quad (3.55)$$

und damit die Rauigkeitskorrektur:

$$S(\bar{\theta}) = \frac{\cos \theta_r' \cos \theta_i}{\cos \theta_r'^0 \cos \theta_i'^0} \frac{\chi}{1 - f + f \chi \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_r'^0}} \quad (3.56)$$

Die Berechnung der Hilfsgrößen E_1 , E_2 und χ ist ebenso wie die des Parameters f unabhängig vom betrachteten Fall, wobei f an dieser Stelle als Anteil des Beobachtungsschattens im Bestrahlungsschatten zu interpretieren ist.

3.6 Planetare Reflexionsgesetze

Reflexionsgesetze unterscheiden sich in der Modellierung der Geometrie sowie der Einbeziehung weiterer Parameter, wobei sich die Effekte nicht streng trennen lassen. Sie können grundsätzlich in empirische und physikalisch interpretierbare, semi-empirische Modelle eingeteilt werden. Das in der planetaren Photometrie am weitesten verbreitete Modell ist das von HAPKE (1981- 2008). Sowohl das Lunar-Lambert- als auch das Minnaert-Modell können dieses approximieren, wenn die Parameter phasenwinkelabhängig modelliert sind.

3.6.1 Lambertsches Kosinusgesetz

Den einfachsten Fall eines Reflexionsgesetzes stellt das Modell von Lambert dar. Unter der Annahme, dass einfallende Strahlung direkt an der Oberfläche vollkommen diffus und isotrop reflektiert wird, hängt die Reflexion nicht von der Beobachtungsrichtung θ_r sondern nur vom Bestrahlungswinkel θ_i sowie von der Lambert-Albedo A_L ab:

$$R = A_L \cos \theta_i \quad (3.57)$$

Die Lambert-Albedo stellt ein Maß für die Gesamthelligkeit der Oberfläche dar und ist äquivalent zum Reflexions- bzw. Strahldichtefaktor, vgl. Abschnitt 3.4.3 und Gleichung (3.20). Aufgrund seiner Einfachheit wird das Lambertsche Kosinusgesetz in verschiedenen Fachrichtungen vielfach eingesetzt – z.B. zur

Auswertung von HRSC-Daten mittels Shape-from-Shading (DORRER et al. 2005, DORRER & KIRK 2007) –, auch wenn es natürliche Oberflächen nur näherungsweise beschreibt.

3.6.2 Lommel-Seeliger-Modell

Im Lommel-Seeliger-Modell (auch *lunarlike function*) wird gegenüber dem Lambert-Gesetz (3.57) die Volumenstreuung in oberflächennahen Schichten berücksichtigt. Es geht davon aus, dass einfallende Strahlung in die Oberfläche eindringt und dabei in Abhängigkeit von der Eindringtiefe gedämpft wird. In gleicher Weise wird die aus dieser Tiefe zurück gestreute (reflektierte) Strahlung gedämpft. Daraus folgt wiederum eine modellspezifische Albedo A_{LS} und damit:

$$R = A_{LS} \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \quad (3.58)$$

Diese Reflexionsgeometrie bildet die Basis für eine Reihe komplexer Reflexionsmodelle wie beispielsweise Hapke (siehe Teilabschnitt 3.6.5).

3.6.3 Lunar-Lambert-Modell

Das Lunar-Lambert-Modell stellt eine Linearkombination der Reflexionsmodelle von Lommel-Seeliger und Lambert dar. Es lautet in der von MCEWEN (1986) vorgeschlagenen Form:

$$R = A_N \left[2L \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} + (1 - L) \cos \theta_i \right] \quad (3.59)$$

Das Modell umfasst zwei Parameter: die Normalalbedo A_N und den Gewichtungsfaktor (*limb darkening parameter*) L . Für $L = 0$ entspricht es dem Lambert-Modell, für $L = 1$ dem Lommel-Seeliger-Modell. Da im Fall $\theta_i = \theta_r = 0^\circ$ (vgl. Definition der Normalalbedo im Abschnitt 3.4.5) der Lommel-Seeliger-Term genau halb so groß wie der Lambert-Term ist, erklärt sich die Gewichtung mit dem Faktor 2.

Das Lunar-Lambert-Gesetz ist in der planetaren Photometrie weit verbreitet, da es eine zufriedenstellende Beschreibung der Oberflächen vieler Himmelskörper darstellt (JOHNSON et al. 2008). Es wurde beispielsweise von LOHSE et al. (2006) zur DGM-Ableitung mittels Mehrbild-Shape-from-Shading auf Daten der Mond-Oberfläche angewendet. Dabei ermöglicht die phasenwinkelabhängige Modellierung der Parameter A_N und L , das deutlich komplexere Hapke-Modell zu approximieren (MCEWEN 1991, KIRK et al. 2004, GEHRKE 2007). Die Zweckmäßigkeit dieses „stellvertretenden“ Ansatzes für die Ziele der vorliegenden Arbeit wird im Abschnitt 5.4 diskutiert.

3.6.4 Minnaert-Funktion

Das Reflexionsmodell von MINNAERT (1941) basiert auf dem Helmholtzschen Reziprozitätsprinzip und stellt eine Verallgemeinerung des Lambertschen Modells dar:

$$R = A_M \cos^k \theta_i \cos^{k-1} \theta_r \quad (3.60)$$

Die beiden Parameter A_M und k sind empirische „Konstanten“, die jedoch vom Phasenwinkel (Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel) abhängen. Obwohl das Modell in der Praxis mehrdeutig bzw. nicht plausible Resultate liefern kann (VEVERKA et al. 1986), wird es für kleine Phasenwinkel, welche beispielsweise bei erdgebundenen Beobachtungen vorliegen, benutzt (z.B. für den Mars: DE GRENIER & PINET 1995, SODERBLOM et al. 2006a sowie Überblick in JOHNSON et al. 2008). JEHL et al. (2008) haben es auch auf HRSC-Daten angewendet.

Vergleichbar zum Lunar-Lambert-Modell kann die Minnaert-Funktion verfeinert werden, wenn die Parameter phasenwinkelabhängig modelliert werden (MCEWEN 1991). Einige komplexere Reflexionsmodelle

bauen auf die Funktion auf. Beispielsweise berücksichtigt das CSAR-Modell (*coupled surface-atmosphere reflectance model*) nach RAHMAN et al. (1993) zusätzlich die Anisotropie mittels der Henyey-Greenstein-Phasenfunktion (Abschnitt 3.5.3.2) sowie den Oppositionseffekt (Abschnitt 3.5.4).

3.6.5 Reflexionsmodell von Hapke

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen, empirischen Reflexionsmodellen basiert die von HAPKE (1981-2008) entwickelte und verfeinerte Funktion auf bis zu neun physikalisch interpretierbaren Parametern. Die vollständige Modellierung umfasst die Beschreibung der Reflexion an einem Einzelteilchen und den Wechselwirkungen zwischen den Teilchen innerhalb der Oberfläche, im Einzelnen:

- Teilchenalbedo: 1 Parameter w (Abschnitt 3.5.2)
- Phasenfunktion P : 2 Parameter b, c (Abschnitt 3.5.3)
- Porositätskorrektur K : 1 Parameter F (Abschnitt 3.5.5)
- Mehrfachstreuung M : w, F (Abschnitte 3.5.2 und 3.5.5)
- Oppositionseffekt B_{SH} : 2 Parameter B_{SH0}, h_{SH} (Abschnitt 3.5.4.1)
- Oppositionseffekt B_{CB} : 2 Parameter B_{CB0}, h_{CB} (Abschnitt 3.5.4.2)
- Oberflächenrauigkeit S : 1 Parameter $\bar{\theta}$ (Abschnitt 3.5.6)

Die Reflexionsgeometrie basiert auf Lommel-Seeliger (3.58), wobei die Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel durch ihre effektiven Werte entsprechend der Parametrisierung der Oberflächenrauigkeit ersetzt werden müssen. Damit lautet das vollständige Hapke-Modell

$$R = K(F) \frac{w}{4} \frac{\cos \theta_i'}{\cos \theta_i' + \cos \theta_r'} \left[B_{SH}(\alpha, B_{SH0}, h_{SH}) P(\alpha, b, c) + M(\theta_i, \theta_r, F) \right] B_{CB}(\alpha, B_{CB0}, h_{CB}) S(\bar{\theta}) \quad (3.61)$$

bzw. ohne die erst kürzlich von HAPKE (2008) vorgeschlagene und daher praktisch bisher nicht mitbestimmte Porosität:

$$R = \frac{w}{4} \frac{\cos \theta_i'}{\cos \theta_i' + \cos \theta_r'} \left[B_{SH}(\alpha, B_{SH0}, h_{SH}) P(\alpha, b, c) + M(\theta_i, \theta_r) \right] B_{CB}(\alpha, B_{CB0}, h_{CB}) S(\bar{\theta}) \quad (3.62)$$

Das Hapke-Modell ist für die unterschiedlichen Himmelskörper sehr gut geeignet und in der planetaren Photometrie weit verbreitet. Allerdings bedarf die Bestimmung aller neun – bzw. ohne die Porosität acht – Parameter einer breiten Verteilung der Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel über den Halbraum, die oftmals nur unter Laborbedingungen gegeben ist (z.B. Untersuchungen von HAPKE et al. 1998 oder CORD 2003). Bei der Analyse von Fernerkundungsdaten muss, je nach Beobachtungskonstellation, das Modell zumeist reduziert werden. So sind für die Modellierung des Oppositionseffektes kleine Phasenwinkel notwendig, und sämtliche Parameter des SHOE und CBOE sind selbst dann kaum signifikant bestimmbar (siehe Abschnitt 5.3.5). Viele Berechnungen beschränken sich daher auf die Amplitude B_{SH0} des SHOE – vgl. Übersicht einiger Planeten, Monde und Asteroide in HELFENSTEIN et al. (1997) – oder den Parameter h_{SH} (JOHNSON et al. 2008).

Das Hapke-Modell ohne den Oppositionseffekt umfasst vier Parameter, wobei die Phasenfunktion zum Teil auch auf die Bestimmung von b und damit das Modell um den Parameter c (= 1) reduziert wird:

$$R = \frac{w}{4} \frac{\cos \theta_i'}{\cos \theta_i' + \cos \theta_r'} \left[P(\alpha, b, c) + M(\theta_i, \theta_r) \right] S(\bar{\theta}) \quad (3.63)$$

Dieser Ansatz wurde u.a. von PINET et al. (2005, 2006) und JEHL et al. (2006) auf HRSC-Daten der Mars-Oberfläche angewendet. Einen aktuellen Überblick über die Vorgehensweisen und Ergebnisse der Hapke-Modellierung für den Mars anhand unterschiedlicher Experimente geben JOHNSON et al. (2008).

Zur Beschreibung der richtungsabhängigen Reflexion an einem einzelnen Teilchen – z.B. zur Auswertung entsprechender Laborexperimente (HAPKE & MCGUIRE 1995, HARTMAN & DOMINGUE 1998) – reduziert sich (3.63) um die Wechselwirkungen innerhalb der Oberfläche, also um Mehrfachstreuungen zwischen den Partikeln und den Einfluss der makroskopischen Rauigkeit:

$$R = \frac{w}{4} \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} P(\alpha, b, c) \quad (3.64)$$

Werden weiterhin die Teilchenalbedo und die Phasenfunktion in einem (isotropen) Parameter zusammengefasst, entsteht das Lommel-Seeliger-Modell; vgl. Formel (3.26) zum Zusammenhang zwischen Teilchenalbedo w und der in (3.58) verwendeten, die Oberfläche als Einheit beschreibenden Normalalbedo A_N .

Das Hapke-Modell kann auch zur Beschreibung der Streuvorgänge an den Teilchen in der Atmosphäre, d.h. zur Parametrisierung von Luftlicht, verwendet werden; vgl. z.B. KAHN et al. (1992) für Daten der *Viking-Lander*. Dabei gibt es für die oberflächenspezifischen Einflüsse wie Porosität, Oppositionseffekt und makroskopische Rauigkeit keine Entsprechung, sodass das Atmosphärenmodell die Teilchenalbedo und (in Anbetracht der stark gerichteten Vorwärtsstreuung zumeist einen) Parameter der Phasenfunktion umfasst. Aufgrund der Überlegungen im Teilabschnitt 3.2 wird diese Möglichkeit hier jedoch nicht weiter verfolgt. Siehe auch Luftlichtauswertung im Abschnitt 6.7.3.

4 Ansatz zur vollständigen Oberflächenbestimmung

Für die geometrische und radiometrische Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten wird auf den photogrammetrischen Ansatz des Facetten-Stereosehens aufgebaut – eine flexible Methode zur objektraumbasierten Bildauswertung. Dabei werden die traditionellen Einzelschritte der Bildzuordnung, Objektpunktbestimmung, Oberflächenmodellierung und Orthoprojektion unter Verwendung der gesamten zur Verfügung stehenden Informationen (sämtliche Pixel aus beliebig vielen Bildern) integriert. Der Grundansatz umfasst sowohl die geometrische als auch die radiometrische Anpassung der Bilddaten. Ergebnisse sind das DGM sowie ein Orthobild des Objekts. Durch die gemeinsame Modellbestimmung können die Zusammenhänge zwischen Objektgeometrie und –radiometrie implizit berücksichtigt werden, wobei in den meisten (photogrammetrischen) Anwendungen die DGM-Ableitung im Vordergrund steht.¹⁴ Der große Unterschied zur klassischen Bildzuordnung (*image matching*), auf der auch die systematische photogrammetrische Prozessierung der HRSC-Daten basiert, ist die gemeinsame Bestimmung der Oberflächenmodelle (Abbildung 4.1). Aufgrund seiner Flexibilität bildet das Facetten-Stereosehen eine gute Voraussetzung für die vollständige Modellierung der Mars-Oberfläche.

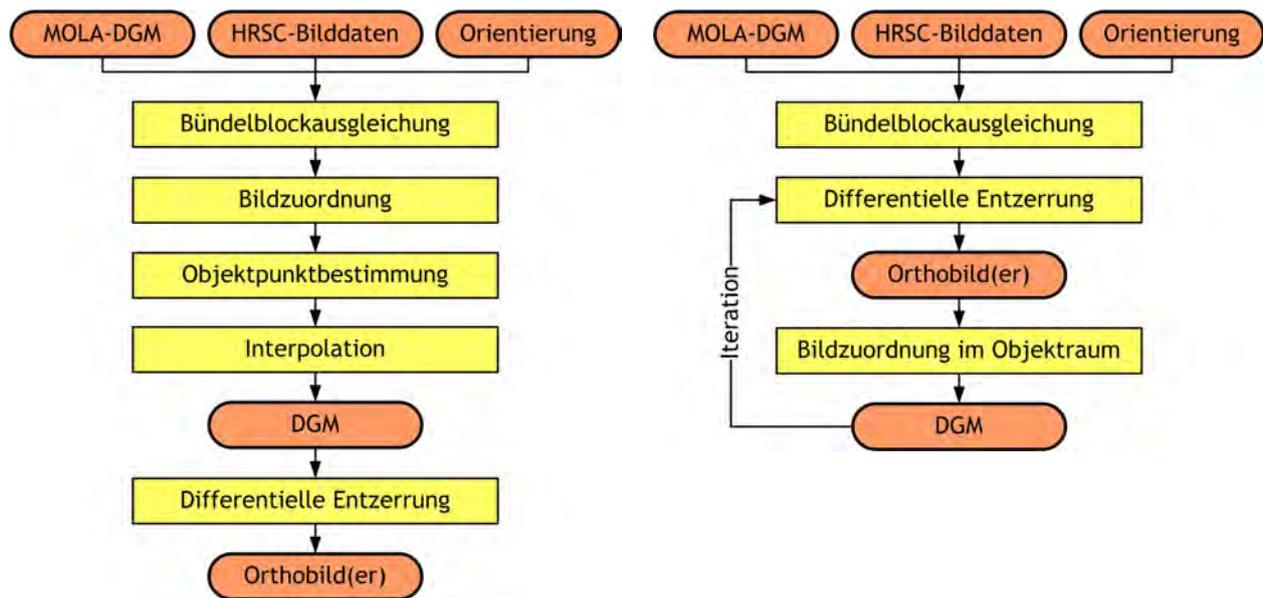


Abbildung 4.1, links: Photogrammetrische Verarbeitungskette bei der systematischen Prozessierung von HRSC-Daten am DLR (SCHOLTEN et al. 2005). Rechts: Integration der Verarbeitungsschritte bei der Bildzuordnung im Objektraum, hier (noch) ohne die explizite Darstellung der radiometrischen Modellierung.

Das Facetten-Stereosehen wurde von WROBEL (1987a, 1987b, 1989) zeitgleich mit den unabhängig entwickelten, vergleichbaren Verfahren von EBNER et al. (1987) und HELAVA (1988) vorgestellt und u.a. von HEIPKE (1991), WEISENSEE (1992), WROBEL et al. (1992) sowie SCHLÜTER (1999) weiterentwickelt. Mögliche Ansätze zur Auswertung von Zeilenscannerdaten zeigen DIEHL & HEIPKE (1992) oder SCHLÜTER (2000).

¹⁴ Für diesen Fall wird die radiometrische Datenanpassung mittels lokal linearer Transferfunktionen vorgeschlagen (siehe dazu Abschnitt 4.5.2). Derartige radiometrische Transformationsparameter sind nicht unmittelbar interpretierbar, z.B. als Reflexionsmodell der Oberfläche.

Die Grundlagen zur Verarbeitung von HRSC-Daten der Mars-Oberfläche mittels Facetten-Stereosehen sind in GEHRKE & HAASE (2006a, 2006b), GEHRKE (2007) sowie HAASE (2007) beschrieben.

Die Ableitung materialspezifischer Oberflächeneigenschaften anhand richtungsabhängiger Reflexionsmodelle lässt sich in den Berechnungsablauf integrieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Reflexionseigenschaften auch ausgenutzt, um zusätzliche Bedingungen für die lokalen Oberflächenneigungen zu formulieren und damit die Berechnung der DGM-Höhen zu stabilisieren. Durch diese Integration von Bildzuordnung (Facetten-Stereosehen) und Photoklinometrie werden die Vorteile beider Verfahren – die absolute Bestimmung der Geometrie und ihre relative Verfeinerung anhand der Radiometrie – für die DGM-Berechnung ausgenutzt. Somit wird ein Algorithmus präsentiert, der die Ableitung geometrischer und radiometrischer Oberflächeneigenschaften in einen Ausgleichsansatz integriert. Ergebnisse sind das DGM, die Albedo und je nach Reflexionsmodell anisotrope, materialspezifische Parameter. Die Basis dieses objektraumbasierten Ansatzes bilden dabei nicht die originalen HRSC-Daten, sondern daraus abgeleitete Orthobilder, die im Rahmen der iterativen Berechnung verfeinert werden und schließlich auch ein Berechnungsergebnis darstellen.

Um dabei wirkliche Oberflächeneigenschaften bestimmen zu können, wird auch der Einfluss der Mars-Atmosphäre modelliert und korrigiert.

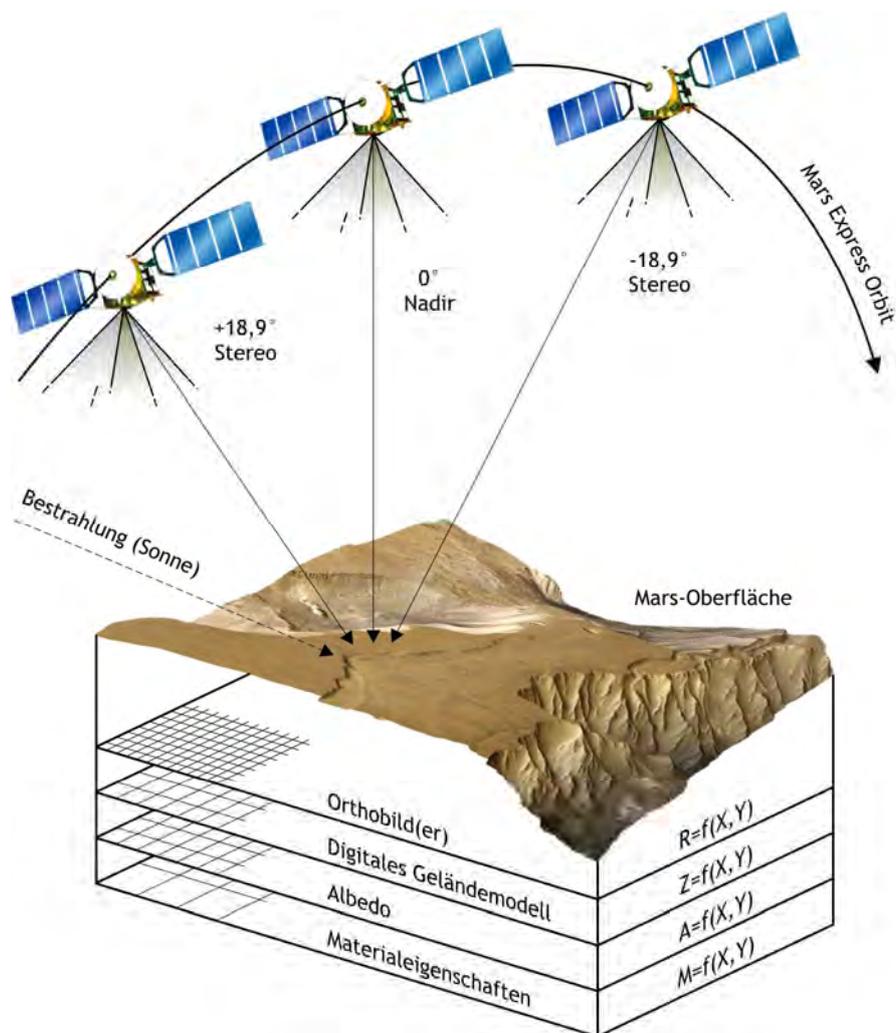


Abbildung 4.2: Aufnahme der Mars-Oberfläche durch die HRSC und Oberflächenmodelle.

4.1 Ausgleichsrechnung

Bei der Ableitung der Oberflächenmodelle wird die vermittelnde Ausgleichung mehrfach eingesetzt. Daher wird ein kurzer Überblick über die Eingangsgrößen, Berechnungsformeln und Ergebnisse gegeben. Details und Herleitungen können der Fachliteratur (z.B. NIEMEIER 2002) entnommen werden.

Die Ausgleichung ermöglicht die Schätzung der Unbekannten unter Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen (Residuen), welche bei überbestimmten Problemstellungen aufgrund zufälliger Messfehler zwangsläufig auftreten. Eingangsgrößen sind das funktionale Modell, das den Zusammenhang zwischen Beobachtungen l und Unbekannten x (bei nichtlinearen Zusammenhängen in einer anhand von Näherungswerten x_0 linearisierten Form) beschreibt, in der Designmatrix A mit

$$l + v = Ax \quad (4.1)$$

sowie das stochastische Modell in der Kovarianzmatrix C_{ll} , die die mittleren Fehlerquadrate und Korrelationen der Beobachtungen enthält. Mit der Festlegung des mittleren Fehlers der Gewichtseinheit $\sigma_{0 \text{ a priori}}$ werden die Kofaktorenmatrix Q_{ll} zur Beschreibung von Genauigkeitsrelationen und, als Inverse, die Gewichtsmatrix P definiert:

$$P^{-1} = Q_{ll} = \frac{1}{\sigma_{0 \text{ a priori}}^2} C_{ll} \quad (4.2)$$

Die Unbekannten berechnen sich dann aus¹⁵:

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l = N^{-1} A^T P l \quad (4.3)$$

N wird als Normalgleichungsmatrix bezeichnet. Die Genauigkeitsinformationen der Unbekannten, die innere Genauigkeit der Ausgleichung, sind durch die Kofaktorenmatrix

$$Q_{xx} = N^{-1} = (A^T P A)^{-1} \quad (4.4)$$

gegeben. Die empirische Standardabweichung der Gewichtseinheit $\sigma_{0 \text{ a posteriori}}$ folgt aus den Residuen

$$v = Ax - l \quad (4.5)$$

und der Redundanz r (wobei σ^2 als Varianz bezeichnet wird):

$$\sigma_{0 \text{ a posteriori}}^2 = \frac{v^T P v}{r} \quad (4.6)$$

Damit ergeben sich die mittleren Fehler und Korrelationen der Unbekannten, d.h. die Kovarianzmatrix C_{xx} :

$$C_{xx} = \sigma_{0 \text{ a posteriori}}^2 Q_{xx} \quad (4.7)$$

Setzt sich ein Ausgleichungsproblem aus heterogenen Beobachtungen zusammen, ist es sinnvoll, Varianzkomponenten für die einzelnen Beobachtungsgruppen i zu schätzen. Analog zu (4.6) müssen dazu die jeweiligen Verbesserungen gewichtet aufsummiert und durch den Anteil der betreffenden Beobachtungen

¹⁵ Bei nichtlinearen Problemen müssen in Gleichung (4.3) die Beobachtungen l durch Differenzen Δl zu den aus Näherungswerten x_0 berechneten Beobachtungen ersetzt werden. Dann erhält man statt x die Zuschläge Δx zu den Näherungswerten, d.h. $x = x_0 + \Delta x$. Aufgrund der Linearisierung muss das Verfahren iterativ ablaufen (Newton-Iteration).

an der Gesamtredundanz dividiert werden. Die Redundanzmatrix R , welche die Redundanzanteile auf ihrer Diagonalen enthält, ergibt sich aus der gewichteten Kofaktorenmatrix Q_{vv} der Residuen:

$$R = Q_{vv}P = (Q_{11} - AQ_{xx}A^T)P \quad (4.8)$$

Dann folgt:

$$\sigma_i^2 = \frac{v_i^T P_{ii} v_i}{\text{spur}(R_{ii})} \quad (4.9)$$

Der Globaltest des Ausgleichungsmodells, in dem der Schätzwert σ_0 a posteriori mit der Standardabweichung σ_0 a priori verglichen wird, kann dann auch auf die einzelnen durch die jeweiligen Schätzungen σ_i charakterisierten Beobachtungsgruppen – einzelne HRSC-Bilder oder zusätzliche, fiktive Beobachtungen mit dem Ziel der Regularisierung (siehe Teilabschnitt 4.6.3) – angewendet werden, um deren Genauigkeitsrelation zu prüfen. Damit bietet sich zusätzlich die Möglichkeit, diese Relation iterativ anzupassen.

Anhand der Beziehung zwischen Residuen, Beobachtungen und Ausgleichungsmodell,

$$v^T P v = I^T P I - x^T A^T P I, \quad (4.10)$$

lässt sich überprüfen, welcher Anteil der Information $I^T P I$ in die Bestimmung der Unbekannten $x^T A^T P I$ einfließt und welcher als Rauschen $v^T P v$ verbleibt.

4.2 Eingangsdaten für die Oberflächenmodellierung

Für die gemeinsame geometrische und radiometrische Modellierung der Mars-Oberfläche im Rahmen dieser Arbeit werden die folgenden Daten herangezogen:

- Die von der HRSC aufgenommenen und radiometrisch korrigierten **Bilddaten (Reflexionsfaktoren R)** dienen zur Ableitung von Pseudo-Orthobildern, auf deren Basis die Oberflächenmodelle berechnet werden.
- Für die **Orientierungsparameter** der HRSC, bestehend aus Kameraposition und -orientierung jeder aufgenommenen Bildzeile sowie Kamerakonstante und Pixelkoordinaten für die einzelnen CCD-Sensoren werden die durch Bündelblockausgleichung optimierten Werte verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.3).
- **Sonnenvektoren**, d.h. der Sonnenstand zum Aufnahmezeitpunkt jeder Bildzeile, können anhand dieser Zeiten bestimmt werden. Die hier verwendeten Daten stammen aus der Prozessierung am DLR in Berlin-Adlershof.

Die aus den Bilddaten abgeleiteten Pseudo-Orthobilder stellen die eigentlichen Beobachtungen, also stochastische Größen im Sinne der Ausgleichungsrechnung, dar. Die weiteren Parameter werden als bekannt und konstant vorausgesetzt.

Als Näherungswerte für die DGM-Berechnung dienen die Höhen des MOLA-DGMs, siehe Abschnitt 2.3. Für die radiometrische Modellierung werden, je nach Ansatz, entweder keine Startwerte benötigt (z.B. Albedo eines empirischen Reflexionsmodells) oder sie können, wie in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben, aus den gegebenen Bilddaten selbst bestimmt werden.

4.3 Modelle zur Beschreibung natürlicher Oberflächen

Eine beliebige natürliche Oberfläche wird durch ihre Form und Zusammensetzung charakterisiert, d.h. durch die Topographie und die Eigenschaften der Materialien, aus denen sie aufgebaut ist. Diese Größen

stellen grundsätzlich Kontinua dar und müssen für die praktische Modellierung abstrahiert werden. Dazu eignen sich beispielsweise Flächen höherer Ordnung – wie von HELAVA (1988) für die Bildzuordnung im Objektraum vorgeschlagen – oder diskrete Funktionswerte mit Interpolationsfunktionen. Eine einfache und daher weit verbreitete Möglichkeit stellen dabei quadratische Lageraster, zumeist im Zusammenhang mit der bilinearen Interpolation, dar – vgl. z.B. WROBEL (1987a), WEISENSEE (1988, 1992), HEIPKE (1990) oder GEHRKE & HAASE (2006a, 2006b) für die geometrische und/oder radiometrische Modellierung bei der Bildzuordnung im Objektraum sowie auch SCHOLTEN et al. (2005), GWINNER et al. (2005, 2007) oder HEIPKE et al. (2006, 2007) in Bezug auf die DGM-Bestimmung für die Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten. Diese Form der diskreten Objektrepräsentation wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet.

4.3.1 Objektmodelle

Die Topographie der Mars-Oberfläche wird durch ein DGM beschrieben. Unter Materialeigenschaften sind nachfolgend diejenigen Parameter zu verstehen, die aus richtungsabhängigen Reflexionsmodellen ableitbar sind, beispielsweise Albedo, Oberflächenrauigkeit und Korngrößen (vgl. Abschnitt 3.5). Sowohl für eine stereophotogrammetrische Bestimmung des DGMs als auch die Parametrisierung von Reflexionsmodellen sind Bilddaten aus verschiedenen Richtungen nötig, wie sie durch die HRSC systematisch aufgenommen werden. Ein daraus abgeleitetes Orthobild nimmt gewissermaßen eine Sonderstellung unter den Objektmodellen ein: Es entsteht durch die differentielle Entzerrung eines oder mehrerer Bilder, gibt also die Oberfläche unter der bei der Bildaufnahme herrschenden Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie wieder. Während es nach seiner geometrischen Definition einer Orthogonalprojektion entspricht, resultiert die Radiometrie (im Fall der HRSC: Reflexionsfaktoren) sowohl aus der Topographie als auch aus Materialeigenschaften. In Bezug auf die Radiometrie sind daher unterschiedliche Orthobilder derselben Oberfläche denkbar – zu jedem HRSC-Bild kann ein korrespondierendes Orthobild berechnet werden. Wird ein Orthobild aus verschiedenen Einzelbildern zusammengefügt, müssen diese radiometrisch angepasst werden.

Zusammenfassend lassen sich aus HRSC-Bildern folgende Objektmodelle ableiten (vgl. Abbildung 4.2):

- **Orthobild**
- **Digitales Geländemodell (DGM)**
- **Albedo** bzw. Teilchenalbedo = Grundhelligkeit der Oberfläche bzw. des Materials (isotrop)
- **Richtungsabhängige Reflexionseigenschaften** = Materialspezifische Parameter (anisotrop)

Diese Modelle werden bezüglich eines regelmäßigen Lagerasters (X,Y) bestimmt. Die Auflösung des Orthobildes (Größe eines Surfels = *surface element*) orientiert sich an der Pixelgröße der Bilddaten. Das DGM und auch die Parameter eines Reflexionsmodells werden üblicherweise in größeren Facetten bestimmt. Je nach Oberflächenbeschaffenheit kann es dabei genügen, den Geltungsbereich einzelner Parameter wie beispielsweise richtungsabhängige Reflexionseigenschaften für das gesamte (in diesem Rahmen kleine) Auswertgebiet festzulegen. Dies sollte einerseits anhand ihrer Bestimmbarkeit aus dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial und andererseits unter Berücksichtigung der lokalen Variation erfolgen. Fällt diese vergleichsweise gering aus, ist eine Interpolation über entsprechend größere Gebiete zulässig.

4.3.2 Grundlagen der Interpolation

Für die Ableitung von Funktionswerten $Z = f(X,Y)$ aus Objektmodellen oder Bilddaten (Resampling) ist es notwendig, zwischen den bekannten Stützstellen (X_i, Y_i) zu interpolieren. Dafür wird hier die bilineare Interpolation verwendet. In Abbildung 4.3 sowie den nachfolgenden Gleichungen ist diese beispielhaft für eine Höhe Z_P im Punkt P innerhalb einer Bilinearfacette dargestellt, gilt jedoch analog für beliebige Modelle.

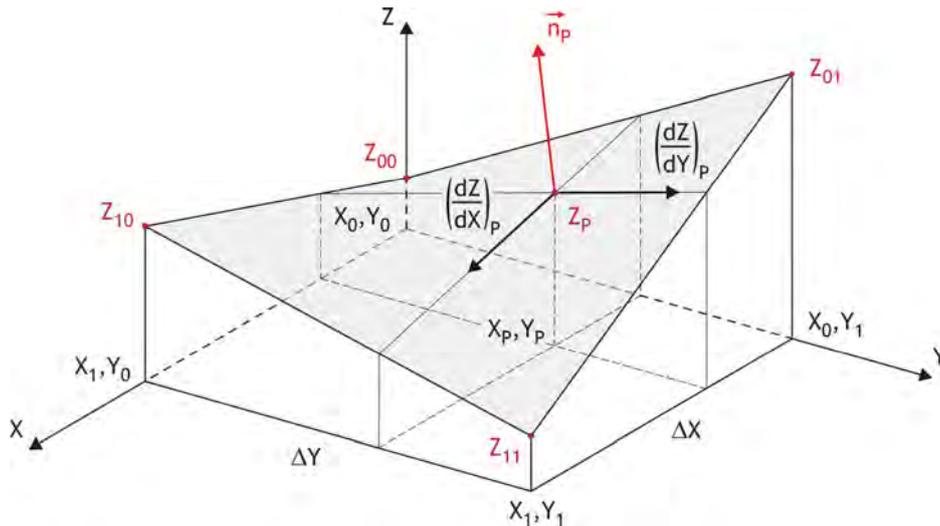


Abbildung 4.3: Bilineare Interpolation zwischen den Stützstellen einer Facette.

Zur Berechnung der Interpolation müssen die Lagekoordinaten des gesuchten Punktes in Bezug auf die Facette vorliegen, d.h. sie müssen auf diese normiert sein:

$$X_P = \frac{X - X_0}{\Delta X} \quad \text{und} \quad Y_P = \frac{Y - Y_0}{\Delta Y} \quad (4.11)$$

Der gesuchte Funktionswert lässt sich dann auf verschiedene Weise formulieren, beispielsweise über die Doppelsumme

$$Z(X_P, Y_P) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \alpha_{ij}(X_P, Y_P) Z_{ij} \quad (4.12)$$

mit den Gewichtungskoeffizienten

$$\begin{aligned} \alpha_{00}(X_P, Y_P) &= 1 - X_P - Y_P + X_P Y_P \\ \alpha_{10}(X_P, Y_P) &= X_P - X_P Y_P \\ \alpha_{01}(X_P, Y_P) &= Y_P - X_P Y_P \\ \alpha_{11}(X_P, Y_P) &= X_P Y_P \end{aligned} \quad (4.13)$$

für die bekannten Funktionswerte in den vier umliegenden Stützstellen.

Für das DGM wird zusätzlich die Interpolation von Oberflächennormalen notwendig, beispielsweise für die Berechnung der lokalen Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie. Nach Abbildung 4.3 gilt für einen Normalenvektor:

$$\vec{n}(X_P, Y_P) = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_P \\ -\left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Die bilineare Interpolation kann mittels der Gleichungen (4.12) und (4.13), differenziert nach X_P bzw. Y_P , berechnet werden. Gegebenenfalls muss anschließend noch eine Normierung erfolgen.

4.4 Koordinatensysteme und Facettendefinition

Das kartesische Koordinatensystem für den Mars ist durch seine Rotationsachse (Richtung Z_M) und den Krater *Airy-0* definiert, der den Referenzmeridian $\lambda = 0^\circ$ festlegt. Die Koordinatenachsen X_M und Y_M ergeben sich dementsprechend in der Äquatorebene. Der Ursprung des Systems liegt im Mittelpunkt des Referenzkörpers – in diesem Fall die MOLA-Kugel, die sowohl den Lage- als auch den Höhenbezug bildet (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die Berechnung der Objektmodelle erfolgt im lokalen kartesischen Koordinatensystem (X,Y,Z) , das durch den Punkt P_0 der Länge λ_0 und der Breite ϕ_0 definiert ist. Es liegt in diesem Punkt tangential an der MOLA-Kugel mit dem Radius $r = 3\,396,00$ km an; die X -Achse zeigt nach Süden, Z ist die Zenitrichtung. Die Beobachtungen sind im Kamerakoordinatensystem (x,y,z) der HRSC gegeben, wobei y in der Flugbahn liegt¹⁶ und z zum beobachteten Objekt zeigt (Abbildung 4.4).

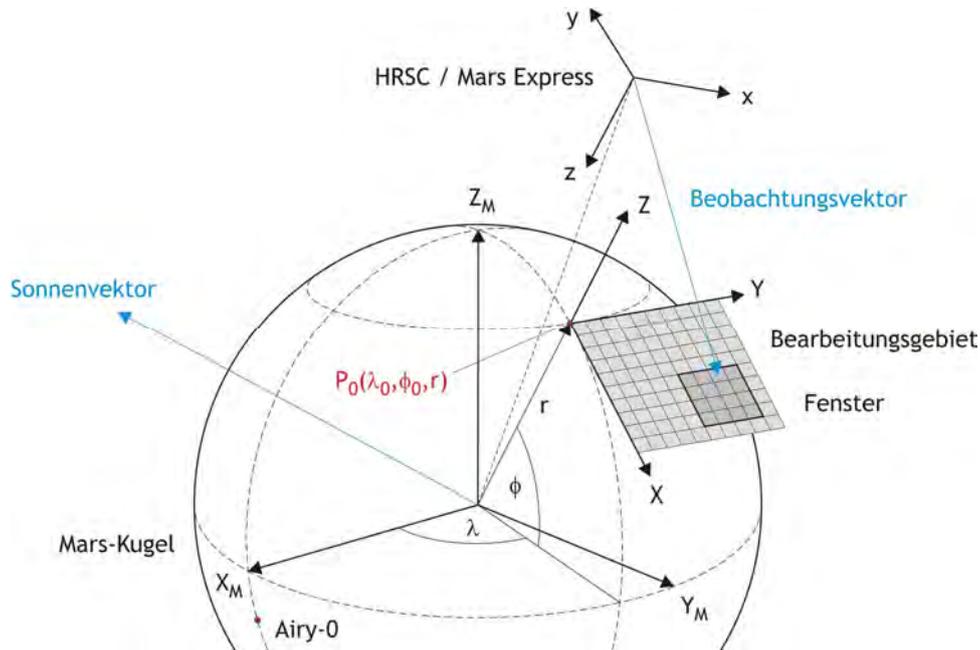


Abbildung 4.4: Koordinatensysteme für die Oberflächenmodellierung aus HRSC-Daten.

Die Transformation zwischen Kugelkoordinaten (ϕ, λ, r) und den lokalen Koordinaten (X, Y, Z) erfordert den Zwischenschritt der globalen kartesischen Koordinaten (X_M, Y_M, Z_M) :

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \lambda \\ \cos \phi \sin \lambda \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Dann gilt:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(\phi_0, \lambda_0) \begin{bmatrix} X_M(\phi, \lambda, r) - X_M(\phi_0, \lambda_0, r) \\ Y_M(\phi, \lambda, r) - Y_M(\phi_0, \lambda_0, r) \\ Z_M(\phi, \lambda, r) - Z_M(\phi_0, \lambda_0, r) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

¹⁶ Die Richtung des Geschwindigkeitsvektors der Sonde *Mars Express* entspricht entweder $+y$ oder $-y$ (siehe JAUMANN et al. 2007). Diese Orientierung ist für jedes HRSC-Bild bekannt und muss bei der Bildauswertung berücksichtigt werden.

Auf diesem Weg müssen die Näherungshöhen aus dem regelmäßigen λ - ϕ -Raster einer mittabstandstreuen Zylinderprojektion (Quadratische Plattkarte; *simple cylindrical projection*) in das Berechnungssystem transformiert werden und die Ergebnisse der Objektmodellierung entsprechend wieder zurück. Der Höhenbezug des DGMs kann anhand tabellierter Undulationen für die weitere wissenschaftliche Auswertung von der MOLA-Kugel auf das Areoid geändert werden.

Die für die Berechnung benötigten Kamerapositionen (X_0, Y_0, Z_0) und -orientierungen $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0)$ sowie die Sonnenvektoren \vec{s} sind im globalen Koordinatensystem gegeben und müssen in das lokale System transformiert werden. Wird die Sonne als Punktquelle im Unendlichen betrachtet, entfällt dabei die Translation. Die Beobachtungsvektoren \vec{v} resultieren aus den Differenzen zwischen den betreffenden äußeren Orientierungen (individuell für jede HRSC-Zeile) und den Koordinaten der jeweiligen Punkte. Damit können schließlich die Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel als Skalarprodukte der entsprechenden Vektoren und der Normalenvektoren berechnet werden – gegenüber der Niveaufläche (hier die Tangentialebene) mit der Zenitrichtung in (ϕ_0, λ_0) und für jede DGM-Facette anhand der aus Gleichung (4.14) bestimmten Normalenvektoren.

Für die Objektmodellierung ist die Vordefinition quadratischer Facetten der Größe $\Delta X = \Delta Y$ im lokalen kartesischen Koordinatensystem notwendig. Dies betrifft sowohl die Surfel $(\Delta X_S, \Delta Y_S)$ für die Orthobilder als auch die aus den Bilddaten abgeleiteten Objektmodelle: das DGM $(\Delta X_{DGM}, \Delta Y_{DGM})$ und die Materialparameter entsprechend des Modellierungsansatzes. Dabei ist es zweckmäßig, mit ganzzahligen Verhältnissen t zwischen den Surfel- und Facettengrößen zu arbeiten; in Bezug auf das DGM gilt dann:

$$t_{DGM} = \frac{\Delta X_S}{\Delta X_{DGM}} \quad (4.17)$$

Je nach Größe und Facettierung des Bearbeitungsgebietes kann es notwendig werden, die Berechnung in mehreren, kleineren Fenstern durchzuführen und die einzelnen Ergebnisse anschließend zum Mosaik zusammenzufügen. Ein Fenster setzt sich aus (k, l) Surfeln und (m, n) Facetten des DGMs bzw. der Materialparameter zusammen¹⁷, mit $k = t_{DGM} m$ und $l = t_{DGM} n$.

4.5 Ableitung von Orthobildern

4.5.1 Berechnung der Pseudo-Orthobilder

Der Vorstufe der Objektmodellierung ist die Ableitung von korrespondierenden Pseudo-Orthobildern¹⁸ zu sämtlichen HRSC-Bildern. Mit dem Ziel der Modellbestimmung in regelmäßigen Lagerastern im Objektraum (s.o.) wird, in Anlehnung an den indirekten Ansatz des Facetten-Stereosehens nach WEISENSEE (1992), die indirekte Orthobildberechnung durch differentielle Entzerrung durchgeführt: Aus den Näherungshöhen Z^0_{ij} im regelmäßigen DGM-Raster werden dazu die Koordinaten (X^0, Y^0, Z^0) für jedes Surfel bilinear interpoliert und unter Verwendung der bekannten Orientierungsdaten – Kamerakonstante c , Kamerapositionen (X_0, Y_0, Z_0) und Beobachtungswinkel (Rotationsmatrix mit $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$) – in jeden HRSC-Bildstreifen projiziert. Dies geschieht anhand der Kollinearitätsgleichungen (z.B. KRAUS 2004)

¹⁷ Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Facettengrößen der einzelnen Objektparameter unterschiedlich sein können. Dies allerdings auch durch individuelle Variablen für jeden einzelnen Parameter zu dokumentieren, wäre für die Übersichtlichkeit der nachfolgenden Darstellungen eher nachteilig.

¹⁸ Die Bezeichnung Pseudo-Orthobild wird verwendet, um ein vorläufiges, auf der Basis von Näherungshöhen berechnetes und daher mit geometrischen (Rest-)Fehlern behaftetes Bild vom endgültigen, verzerrungsfreien und damit „echten“ Orthobild (*true orthoimage*) zu unterscheiden.

$$\begin{aligned}
 x &= c \frac{r_{11}(X^0 - X_0) + r_{21}(Y^0 - Y_0) + r_{31}(Z^0 - Z_0)}{r_{13}(X^0 - X_0) + r_{23}(Y^0 - Y_0) + r_{33}(Z^0 - Z_0)} \\
 y &= c \frac{r_{12}(X^0 - X_0) + r_{22}(Y^0 - Y_0) + r_{32}(Z^0 - Z_0)}{r_{13}(X^0 - X_0) + r_{23}(Y^0 - Y_0) + r_{33}(Z^0 - Z_0)}
 \end{aligned} \quad (4.18)$$

muss aber iterativ durchgeführt werden, da jede einzelne Bildzeile ihre individuelle äußere Orientierung aufweist. Dabei kann mit der Orientierung einer beliebigen Zeile begonnen werden (wenn beispielsweise die Lage des Bearbeitungsgebietes im HRSC-Streifen nicht bekannt ist) und muss weitergesucht werden, bis die ermittelte Bildkoordinate y innerhalb der betrachteten HRSC-Zeile y_{Soll} im Bildkoordinatensystem liegt (vgl. Abbildung 4.5). Für diese Suche kann die bekannte Integrationszeit¹⁹ ausgenutzt werden, womit das Verfahren aufgrund der relativ gleichförmigen Bewegung im *Mars-Express*-Orbit schnell konvergiert.

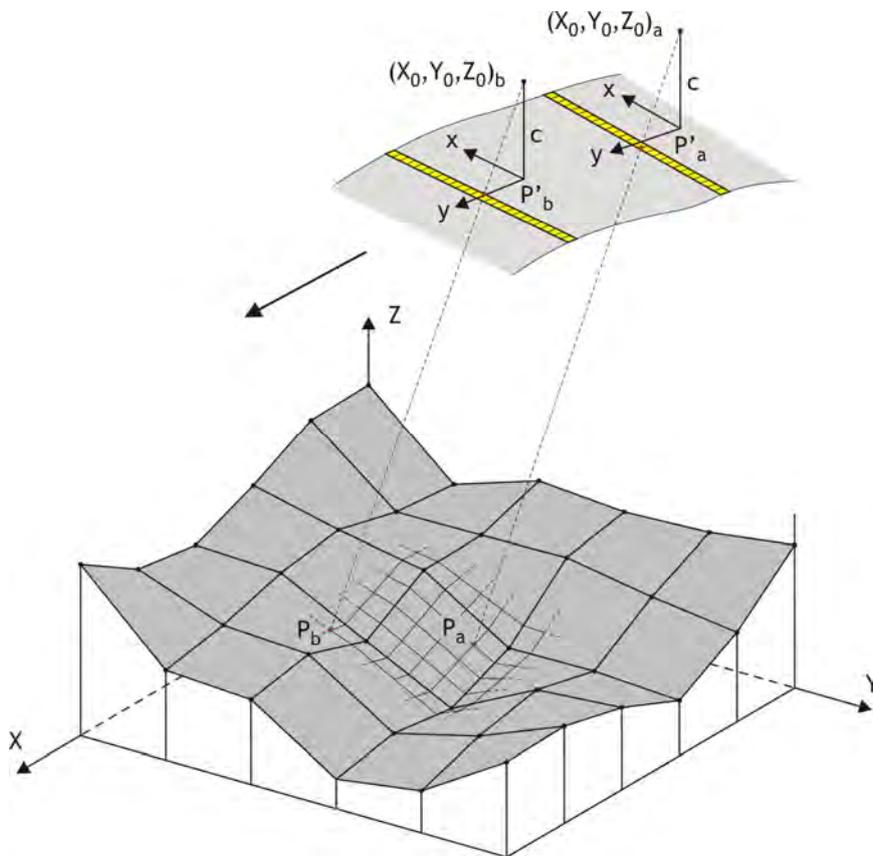


Abbildung 4.5: Differentielle Entzerrung eines Zeilenscanner-Bildstreifens am Beispiel zweier Surfel (Orthobildpixel) P_a und P_b , abgebildet in den Zeilen a und b, anhand bilinear interpolierter DGM-Höhen (vgl. Abbildung 4.3).

Der Reflexionsfaktor R für ein Surfel wird schließlich bilinear interpoliert. Dabei erfolgt die Berechnung der normierten, pixelbezogenen Koordinate innerhalb der Zeile nach Gleichung (4.11), wobei Δx genau

¹⁹ Es sei angemerkt, dass die Integrationszeit innerhalb eines HRSC-Bildstreifens nicht konstant sein muss. Prinzipiell wird sie in Abhängigkeit von Flughöhe und Bahngeschwindigkeit so angepasst, dass die einzelnen Pixel möglichst quadratische Oberflächenelemente darstellen und damit die Bodenauflösung in allen Richtungen etwa gleich ist. Insbesondere bei längeren Bildstreifen liegen aufgrund des elliptischen Orbits sehr unterschiedliche Flughöhen und damit auch unterschiedliche Bodenaufösungen innerhalb der Zeile vor, sodass die Integrationszeit entsprechend variiert (JAUMANN et al. 2007). Sie ist für jede Zeile bekannt.

der Pixelgröße von $7 \mu\text{m}$ entspricht. Zwischen den betreffenden Zeilen wird Δy als Summe der Beträge der jeweiligen Abstände $|y - y_{\text{Soll}}|$ gebildet; es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Bildpixel quadratisch sind. Ein Extremfall nichtquadratischer Pixel ist in Abbildung 6.25 veranschaulicht.

Analog dazu werden die äußeren Orientierungen linear zwischen den Zeilen interpoliert, sodass schließlich für jedes Surfel der zu den HRSC-Bildern korrespondierenden Pseudo-Orthobilder ein Reflexionsfaktor R sowie eine Kameraposition und -orientierung vorliegen.

4.5.2 Radiometrische Bildanpassung

Aufgrund der anisotropen Material- und Oberflächeneigenschaften weisen die unter verschiedenen geometrischen Bestrahlungs- und/oder Beobachtungsbedingungen aufgenommenen Bilddaten und damit auch die Pseudo-Orthobilder radiometrische Differenzen auf. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass anhand von bidirektionalen Reflexionsmodellen die Bestimmung der Materialeigenschaften aus Bilddaten prinzipiell möglich ist (siehe Abschnitte 4.8.2 und 4.8.3).

Für die DGM-Berechnung mittels Bildzuordnung, also auch für die Ausgleichung auf Basis des Facetten-Stereosehens, ist es allerdings notwendig, diese radiometrischen Bildunterschiede anzugleichen. Als Referenz sollte dabei die Nadiraufnahme der HRSC gewählt werden, da diese meist die höchste Auflösung besitzt. Bei der Anpassung müssten theoretisch sämtliche, im Abschnitt 3.2 diskutierte Einflussfaktoren sowie Richtungs- bzw. Sensorabhängigkeiten entsprechend Gleichung (3.1) berücksichtigt werden. Mit dem Ziel der rein geometrischen Modellierung werden in der photogrammetrischen Praxis allerdings oft lineare Transformationen, also Helligkeits- und Kontrastanpassungen der Bilddaten, angesetzt. Sie sind impliziter Bestandteil vieler Bildzuordnungsansätze – z.B. sind Interestoperatoren in der Regel invariant gegenüber Helligkeits- und Kontrastunterschieden – oder werden, wie beim Facetten-Stereosehen und vergleichbaren Ansätzen (HEIPKE 1990, WEISENSEE 1992), vorher durchgeführt.

Ein solches Vorgehen kommt auch in dieser Arbeit zum Einsatz, wobei die Transformationen mit lokalem Geltungsbereich durchgeführt werden, zweckmäßigerweise für jede DGM-Facette (vgl. WEISENSEE 1988). Die bilineare Geometrie der Facette wird dabei implizit als Ebene approximiert. Somit ist die Reflexionsgeometrie konstant und Gleichung (3.1) wird linear. Die Verwendung linearer Transferfunktionen hat praktische Vorteile:

- Das **Reflexionsverhalten der Oberfläche** muss weder bekannt sein noch mitbestimmt werden. Auch wird die geometrische Modellierung nicht durch fehlerhaft parametrisierte Radiometrie gestört. (Für die Mitbestimmung dieser Parameter müssten außerdem zusätzliche Daten, d.h. mehr als die für die Höhenbestimmung benötigte Minimalzahl von zwei Bildern, mit geeigneten Beobachtungsgeometrien vorliegen.)
- Grundsätzlich spiegeln sich sämtliche radiometrische Unterschiede zwischen den einzelnen Bildern in den Transferfunktionen wider, d.h. neben der Reflexionsgeometrie auch die **Atmosphäre** sowie **Kameraeigenschaften** bzw. Restfehler in ihrer radiometrischen Kalibrierung (Abschnitt 2.2.3.3). Da auch diese Einflüsse additive und multiplikative Komponenten aufweisen, sind lineare Transferfunktionen gut geeignet, sie zu modellieren. Die Trennung der einzelnen Einflüsse ist für die rein geometrische Objektbestimmung aus der Bildzuordnung nicht notwendig.

Mit der linearen Histogrammanpassung liefert die Bildzuordnung im Objektraum in der Regel zuverlässige Resultate (vgl. z.B. HELAVA 1988, WEISENSEE 1992, GEHRKE 2007).

4.5.3 Die Pseudo-Orthobilder als Beobachtungen

Die einzelnen Pseudo-Orthobilder, d.h. Reflexionsfaktoren sämtlicher Pixel, werden als beobachtete Größen für den Ausgleichungsansatz zur Modellierung der Mars-Oberfläche aufgefasst.

Durch die Interpolation der Pseudo-Orthobilder sind benachbarte Surfel innerhalb der Bildmatrix eines HRSC-Kanals korreliert. Zu der ohnehin vorhandenen physikalischen und mathematischen Korrelation – aufgrund der Analog-Digital-Wandlung, Kompression, Dekompression und radiometrischen Korrektur, um nur einige Einflüsse aufzuzählen – kommt also eine weitere mathematische Komponente hinzu. Da diese Zusammenhänge in ihrer Gesamtheit nur schwer abzuschätzen sind, erscheint es zweckmäßig, die einzelnen Reflexionsfaktoren der Pseudo-Orthobilder als unkorreliert und unter Berücksichtigung der im Abschnitt 2.2.3.3 dargelegten radiometrischen Eigenschaften der HRSC außerdem als gleich genau anzunehmen.²⁰

Das stochastische Ausgleichungsmodell setzt sich aus den Kovarianzmatrizen C_{II} der verwendeten HRSC-Kanäle zusammen. In der Regel sind das mindestens der Nadir (ND) und die beiden Stereokanäle (S1 und S2). Mit der Annahme gleich genauer Beobachtungen, woraus zugleich die Standardabweichung der Gewichtseinheit $\sigma_{0 \text{ a priori}}$ folgt, ergibt sich für die Pseudo-Orthobilder der Dimension (k,l) aus b Kanälen:

$$C_{II(b \times k l \times b \times k l)} = \begin{bmatrix} C_{II-ND(kl \times kl)} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & C_{II-S1(kl \times kl)} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & C_{II-S2(kl \times kl)} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} = \sigma_1^2 E = \sigma_{0 \text{ a priori}}^2 E \quad (4.19)$$

Dann entsprechen die Kofaktorenmatrix Q_{II} und folglich auch die Gewichtsmatrix P der Beobachtungen der Einheitsmatrix:

$$Q_{II} = \frac{1}{\sigma_{0 \text{ a priori}}^2} C_{II} = E = P_{II} \quad (4.20)$$

Die Annahme gleich genauer Beobachtungen für die einzelnen HRSC-Kanäle wird durch Varianzkomponentenschätzung nach der Ausgleichung verifiziert, vgl. Kapitel 6.

4.5.4 Orthobild der Mars-Oberfläche

Der allgemeine Ansatz der Bildzuordnung im Objektraum sieht die Berechnung von DGM und Orthobild der Mars-Oberfläche in einer gemeinsamen Ausgleichung vor (z.B. WROBEL 1987a, 1987b). Eine gruppenweise, iterative Ableitung bzw. Verfeinerung von Orthobild und DGM hat sich allerdings als vorteilhaft erwiesen, da aufgrund der geringeren Lageauflösung die Ausgleichungsberechnung eines DGMs deutlich weniger unbekannte Parameter umfasst als die eines Orthobildes. Letzteres wird in der Praxis, sowohl im Facetten-Stereosehen (WEISENSEE 1992, ANDERSSOHN 2004, GEHRKE & HAASE 2006a, 2006b, HAASE 2007) als auch in vergleichbaren Ansätzen (z.B. HELAVA 1987, WIMAN 1998), üblicherweise durch Mittelbildung aus den einzelnen, radiometrisch angepassten Pseudo-Orthobildern berechnet.

Dabei können Lageversätze, die abhängig von den Näherungshöhen vorliegen, zu Unschärfen oder sogar Mehrfachabbildungen führen. Systematische Geometriefehler weist das Mittelbild in Anbetracht der Symmetrie in den Stereowinkeln der HRSC-Daten jedoch nicht auf. Radiometrisch entspricht es dem für die Anpassung als Referenz definierten Bild, in der Regel der Nadiraufnahme.

²⁰ Wenn identische mittlere Fehler der Reflexionsfaktoren R für alle verwendeten HRSC-Bilder angenommen werden, bedeutet dies verschiedene Fehler in Bezug auf die ursprünglichen Messwerte, abhängig von den Transformationsparametern für die einzelnen Bilder. In der Praxis unterscheiden sich diese für die panchromatischen Kanäle selten um mehr als 10%, womit die im Abschnitt 2.2.3.3 vorgenommene Abschätzung der Genauigkeit auf (etwa) 1 DN-Wert grundsätzlich ihre Gültigkeit behält. Der mittlere Fehler von R sollte dann aus der Transformation von 1 DN-Wert mit den Parametern des Nadirkanals der HRSC berechnet werden. Dieses stochastische Modell wird ohnehin anhand der Ausgleichungsergebnisse geprüft.

4.6 DGM-Berechnung auf Basis des Facetten-Stereosehens

Im Facetten-Stereosehen werden, ausgehend von den radiometrisch angepassten Pseudo-Orthobildern, die unbekanntenen Höhen Z_{ij} in den Stützstellen (X_{ij}, Y_{ij}) des DGMs iterativ nach der Methode der kleinsten Quadrate abgeleitet. Dieser Schritt stellt die eigentliche Bildzuordnung dar (vgl. Abbildung 4.6).

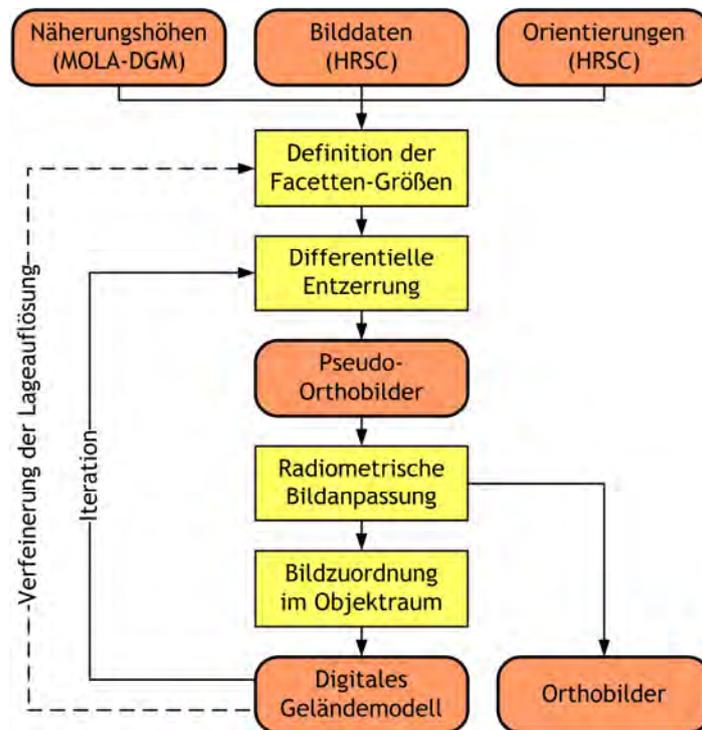


Abbildung 4.6: Facetten-Stereosehen.

4.6.1 Ausgleichungsansatz

Der Ausgleichungsansatz des Facetten-Stereosehens basiert auf den geometrischen und radiometrischen Zusammenhängen zwischen den Bilddaten (Reflexionsfaktoren) und dem Objekt. Er geht von der Taylorreihenentwicklung für den Reflexionsfaktor R in einem Objektsurfel an der Stelle (X^0, Y^0) unter Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung aus:

$$\begin{aligned}
 R(X, Y) &= R^0(X^0 + dX, Y^0 + dY) + dR(X^0, Y^0) \\
 &\approx R^0(X^0, Y^0) + \frac{\partial R^0(X^0, Y^0)}{\partial X} dX + \frac{\partial R^0(X^0, Y^0)}{\partial Y} dY + dR(X^0, Y^0)
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Ein Surfel ist mit den einzelnen Pixeln in den verschiedenen Bildern über die Aufnahmepositionen (X_0, Y_0, Z_0) verknüpft; es muss auf den jeweiligen Sichtstrahlen liegen, welche sich auf der Oberfläche in ebendiesem Surfel schneiden. Der Zusammenhang zwischen Lageänderungen dX , dY und Höhenänderungen dZ gegenüber den Näherungskoodinaten (X^0, Y^0, Z^0) des Surfels lässt sich damit aus den entsprechenden Geradengleichungen herstellen:

$$dX = \frac{\partial X}{\partial Z} dZ = \frac{X^0 - X_0}{Z^0 - Z_0} dZ = X_Z dZ \tag{4.22}$$

$$dY = \frac{\partial Y}{\partial Z} dZ = \frac{Y^0 - Y_0}{Z^0 - Z_0} dZ = Y_Z dZ \tag{4.23}$$

Das Einsetzen von (4.22) und (4.23) in (4.21) führt zur Grundgleichung des Facetten-Stereosehens, die die unbekanntem Zuschläge der DGM-Höhen dZ und Reflexionsfaktoren dR_{Mars} in den einzelnen Surfeln mit den Reflexionsfaktoren R_{HRSC} der radiometrisch angepassten Pseudo-Orthobilder verknüpft:

$$R_{\text{HRSC}}(X, Y) = R_{\text{Mars}}^0(X^0, Y^0) + dR_{\text{Mars}}(X^0, Y^0) + \left[\frac{\partial R^0(X^0, Y^0)}{\partial X} X_Z + \frac{\partial R^0(X^0, Y^0)}{\partial Y} Y_Z \right] dZ \quad (4.24)$$

Theoretisch können so die unbekanntem Objektsurfel des Orthobildes gemeinsam mit den DGM-Höhen bestimmt werden. Aufgrund der im Vergleich zum DGM höheren Orthobildauflösung wird die Berechnung jedoch gruppenweise vorgenommen, was die Zahl der Unbekanntem für die DGM-Ausgleichung deutlich verringert. Es hat sich als zielführend erwiesen, die Facettengröße des DGMs etwa fünf- bis zehnmal so groß zu wählen wie die Surfelgröße (WEISENSEE 1992, ANDERSSOHN 2004). Das Orthobild weist damit das 25- bis 100-fache Datenvolumen auf. Um ausschließlich das DGM abzuleiten, wird das entsprechend Abschnitt 4.4 durch Mittelbildung bestimmte Orthobild als bekannt vorausgesetzt, d.h. $dR_{\text{Mars}} = 0$. Schließlich wird die bilineare Interpolation der Surfel aus den unbekanntem Höhen der Stützstellen auf der Basis von Gleichung (4.12)

$$dZ(X^0, Y^0) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \alpha_{ij}(X^0, Y^0) dZ_{ij} \quad (4.25)$$

in die obige Grundgleichung (4.24) eingesetzt. Aufgrund der regelmäßigen Facettierung im Objektraum, sowohl für die (Pseudo-)Orthobilder als auch für das DGM, ergibt sich ein ebenso regelmäßiges Muster der Koeffizienten für die bilineare Interpolation: Sie sind für jede DGM-Facette identisch. Die unbekanntem Höhen können mittels Ausgleichsrechnung anhand der folgenden Beobachtungsgleichung geschätzt werden:

$$R_{\text{HRSC}}(X, Y) = R_{\text{Mars}}^0(X^0, Y^0) + \left[\frac{\partial R^0(X^0, Y^0)}{\partial X} X_Z + \frac{\partial R^0(X^0, Y^0)}{\partial Y} Y_Z \right] \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \alpha_{ij}(X^0, Y^0) dZ_{ij} \quad (4.26)$$

Die benötigten Gradienten der Reflexionsfaktoren in X- und Y-Richtung werden aus einer entsprechenden Faltung des gemittelten Orthobildes abgeleitet (vgl. WEISENSEE 1992). Das funktionale Ausgleichsmodell A in Gleichung (4.27) enthält die Ableitungen von (4.26) für sämtliche Surfel in b Pseudo-Orthobildern der Dimension (k,l) nach sämtlichen Höhenstützstellen der Dimension (n,m). Die Beobachtungen sind die entsprechenden Reflexionsfaktoren, welche nach (4.19) identische stochastische Eigenschaften aufweisen.

Die Mehrheit der partiellen Ableitungen in der Designmatrix A ist 0, da aufgrund der bilinearen Interpolation nur diejenigen Surfel, welche innerhalb der an eine Stützstelle angrenzenden DGM-Facetten liegen, mit der betreffenden Höhe verknüpft sind. Der schematische Aufbau der A-Matrix ist in der Abbildung 4.7 am Beispiel eines kleinen Auswertgebietes veranschaulicht.

Bei der DGM-Berechnung handelt es sich um ein nichtlineares Problem, welches iterativ gelöst werden muss. Während dabei üblicherweise nur die Linearisierung verbessert wird (Newton-Iteration, siehe NIEMEIER 2002), beinhaltet der Ansatz des Facetten-Stereosehens auch die iterative Neuberechnung der Pseudo-Orthobilder (Abbildung 4.6). Als Abbruchkriterium dienen in diesem Rahmen die Verbesserungen v der Beobachtungen. Wenn deren gewichtete Summe $v^T P v$ nicht weiter sinkt, ist der Informationsgehalt durch die im Ausgleichsansatz gewählte Oberflächenfacettierung ausgeschöpft und $v^T P v$ nach Gleichung (4.10) als zufällig verteiltes Rauschen interpretierbar.

$$A_{(b \cdot lk \times nm)} = \begin{bmatrix}
 \frac{\partial R_{11,ND}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{11,ND}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{11,ND}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{11,ND}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{11,ND}}{\partial Z_{mn}} \\
 \frac{\partial R_{12,ND}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{12,ND}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{12,ND}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{12,ND}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{12,ND}}{\partial Z_{mn}} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \frac{\partial R_{1l,ND}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{1l,ND}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{1l,ND}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{1l,ND}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{1l,ND}}{\partial Z_{mn}} \\
 \frac{\partial R_{21,ND}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{21,ND}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{21,ND}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{21,ND}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{21,ND}}{\partial Z_{mn}} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \frac{\partial R_{kl,ND}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{kl,ND}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{kl,ND}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{kl,ND}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{kl,ND}}{\partial Z_{mn}} \\
 \hline
 \frac{\partial R_{11,S1}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{11,S1}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{11,S1}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{11,S1}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{11,S1}}{\partial Z_{2l}} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \frac{\partial R_{kl,S1}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{kl,S1}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{kl,S1}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{kl,S1}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{kl,S1}}{\partial Z_{mn}} \\
 \hline
 \frac{\partial R_{11,S2}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{11,S2}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{11,S2}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{11,S2}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{11,S2}}{\partial Z_{2l}} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \frac{\partial R_{kl,S2}}{\partial Z_{11}} & \frac{\partial R_{kl,S2}}{\partial Z_{12}} & \dots & \frac{\partial R_{kl,S2}}{\partial Z_{1n}} & \frac{\partial R_{kl,S2}}{\partial Z_{21}} & \dots & \frac{\partial R_{kl,S2}}{\partial Z_{mn}} \\
 \hline
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots
 \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

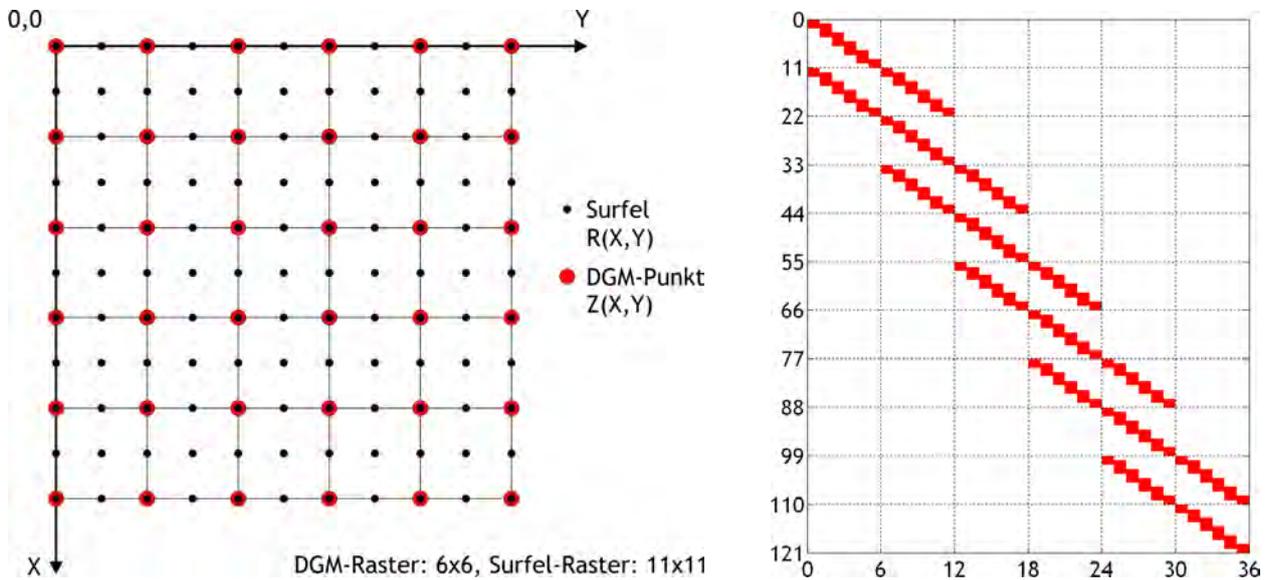


Abbildung 4.7, links: Beispiel eines durch 11 x 11 Surfel und 6 x 6 DGM-Stützstellen abgedeckten Auswertgebietes. Rechts: Aufbau der A-Matrix nach Gleichung (4.27) mit der Dimension 121 x 36 (Anteil eines Pseudo-Orthobildes); von 0 verschiedene Elemente sind rot dargestellt. Jede DGM-Stützstelle im Innern des Auswertgebietes ist mit 3 x 3 Surfel verknüpft, an den Rändern sind es 3 x 2 bzw. 2 x 3 und in den Ecken lediglich 2 x 2 Surfel.

Eine geeignete Festlegung der DGM-Auflösung bzw. die der Surfelanahl pro DGM-Facette ist von der Bildtextur und damit von der Oberflächenstruktur im Maßstabsbereich der Lageauflösung des Sensors abhängig. Insbesondere für HRSC-Daten der Mars-Oberfläche kann auch eine vergleichsweise grobe Facet-

rierung nicht immer sicherstellen, dass verlässliche Höhen in sämtlichen Stützstellen abgeleitet werden können. Hier sind Zusatzbedingungen notwendig, wie sie im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Modellierung mit einem niedrig aufgelösten DGM zu starten und die Auflösung während der iterativen Berechnung schrittweise zu steigern. So ist die Punktzuordnung und damit die Konvergenz des Verfahrens auch bei vergleichsweise ungenauen Startwerten gewährleistet. Unter Umständen kann es genügen, in der größten Facettierungsstufe von einer Ebene mittlerer Geländehöhe auszugehen (vgl. dazu die Untersuchungen von ANDERSSOHN 2004 sowie GEHRKE & HAASE 2006a, 2006b). Für eine feinere Stufe sollte die Summe $v^T P v$ wiederum kleiner werden.

4.6.2 Regularisierung mittels Glattheitsbedingungen

In Abhängigkeit von dem betrachteten Abschnitt der Mars-Oberfläche und von der Bildqualität werden kontrast- bzw. texturarme Regionen in den Bildern vorliegen. Beim Facetten-Stereosehen werden Höhen bezüglich regelmäßiger Stützstellen und damit auch in diesen Regionen bestimmt werden, was Rauschen, einzelne Ausreißer und im Extremfall auch ein Nichtkonvergieren der Ausgleichung zur Folge haben kann. Die Berechnung wird zu einem schlecht gestellten Problem und muss regularisiert werden.

Eine Stabilisierung der DGM-Ausgleichung auf Basis des Facetten-Stereosehens kann zu einem gewissen Grad durch Median- und/oder Gauß-Filterung während der sukzessiven Modellverfeinerung erreicht werden, wie GEHRKE & BISCHOFF (2006) gezeigt haben. Prinzipiell ist aber die Einführung von Zusatzbedingungen wie die Forderung eines glatten (konstant geneigten) DGMs in texturarmen Bildabschnitten in die Ausgleichung von Vorteil: Wenn eine Oberfläche im Bild keine Textur zeigt, weist sie entweder konstante Neigung und Albedo auf oder die Einflüsse von Albedo- und Neigungsunterschieden heben sich aufgrund der Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie gegenseitig auf. Letzteres ist, zumindest theoretisch, beispielsweise bei Dünenformationen vorstellbar, wenn die regelmäßigen Neigungswechsel mit einem entsprechenden Albedomuster aus erodierter Oberfläche und abgelagertem Material einhergehen. In diesem Fall sollten sich jedoch für unterschiedliche Beobachtungsgeometrien variierende Texturen zeigen, sodass das Fehlen von Textur in allen HRSC-Kanälen auf eine glatte Oberfläche einheitlicher Albedo hindeutet.

In Anbetracht dessen erscheint die Regularisierung durch Glattheitsbedingungen zur Stabilisierung der DGM-Ausgleichung sinnvoll. Dazu bieten sich Krümmungsminimierung (FRANEK & MÜLLER 1990, WEISSENSEE 1992) oder adaptive Regularisierung (WROBEL et al. 1992) an, wobei erstere Bedingungen an die absoluten Höhen und letztere an die Zuschläge aus den Iterationsschritten stellt. Formal kann die Glattheitsforderung ausgedrückt werden als Differenz zwischen einer DGM-Höhe zur Verbindungsgeraden der Nachbarpunkte, jeweils in X- und Y-Richtung,

$$0 = Z_{i-1,j} + Z_{i+1,j} - 2Z_{ij} \quad (4.28)$$

$$0 = Z_{i,j-1} + Z_{i,j+1} - 2Z_{ij} \quad (4.29)$$

oder als Glattheit einer Bilinearfacette:

$$0 = Z_{ij} - Z_{i-1,j} + Z_{i+1,j+1} - Z_{i,j+1} \quad (4.30)$$

Die Bedingungen (4.28) und (4.29) oder (4.30) sowie auch eine Kombination dieser können sowohl krümmungsminimierend als auch adaptiv²¹ zu ähnlichen Ergebnissen führen (SCHLÜTER 1999). Von Bedeutung

²¹ Die adaptive Regularisierung bezieht sich auf die Höhenzuschläge dZ . Diese müssen dann in die obigen Gleichungen statt der Höhen Z eingesetzt werden (WROBEL et al. 1992, SCHLÜTER 1999).

ist vielmehr deren individuelle Gewichtung in den einzelnen Stützstellen, wobei diese in der vorliegenden Arbeit im Zusammenhang mit Bedingungen an absolute Höhen, also krümmungsminimierender Regularisierung, untersucht werden. Eine solche Regularisierung lässt sich nach FUA & LECLERC (1995) als a priori Annahme einer ebenen Fläche (*penalty function*) interpretieren, von der die Geländeform genau dort abweichen darf, wo diese Abweichung aus zuverlässigen Bildzuordnungsergebnissen resultiert.

Die Glattheitsbedingungen werden als zusätzliche Beobachtungsgleichungen in die vermittelnde Ausgleichung eingeführt (vgl. NIEMEIER 2002). Das erweiterte Ausgleichungsmodell lautet dann (vgl. Abschnitt 4.1):

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{I}_{\text{Reg}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{v}_{\text{Reg}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_{\text{Reg}} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{Reg}} \quad (4.31)$$

$$\mathbf{C}_{\text{Reg}} = \sigma_0^2 \text{a priori} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{ll}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_{\text{Reg}}^2} \mathbf{Q}_{\text{Reg}} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Durch die im Folgenden diskutierte Festlegung von Varianzen innerhalb weiter Grenzen kann die Stabilisierung individuell angepasst werden.

4.6.3 Datenabhängige Gewichtung zwischen Bildzuordnung und Regularisierung

Obwohl die Annahme der Glattheit eine plausible Möglichkeit zur Regularisierung darstellt, ist sie grundsätzlich eine fiktive Vorgabe und sollte die DGM-Bestimmung aus wirklichen Beobachtungen nur soweit wie nötig stabilisieren. Daher ist eine geeignete Gewichtung der Regularisierung gegenüber der Bildzuordnung notwendig – sowohl global durch den Regularisierungsparameter λ_{Reg} als auch lokal innerhalb der Matrix \mathbf{Q}_{Reg} in Gleichung (4.32).

In der bisherigen Praxis des Facetten-Stereosehens wird die Regularisierung meist in allen Punkten gleich gewichtet²², d.h. $\mathbf{Q}_{\text{Reg}} = \mathbf{E}$ (FRANEK & MÜLLER 1990, WROBEL et al. 1992, TSAY 1996). Mit dem Ziel eines möglichst geringen Regularisierungseinflusses wird – auch in Anbetracht der heterogenen Struktur der Mars-Oberfläche – hier jedoch der Vorschlag von WEISENSEE (1992) weiterverfolgt, die aus Bildzuordnung resultierenden individuellen mittleren Fehler als Gewichtungskriterium heranzuziehen. Grundsätzlich sollten schlecht bestimmte bzw. bestimmbare Höhen einem starken Zwang unterliegen, gut bestimmte Werte einem schwächeren; hier müssen die aufgrund zuverlässig bestimmter Höhen entstehenden Knicke im Gelände zugelassen werden. Demnach sollten die inversen mittleren Höhenfehler als a priori Standardabweichungen der Glattheitsbedingungen eingesetzt werden, womit sich die Elemente von \mathbf{Q}_{Reg} aus der Inversen von \mathbf{Q}_{xx} (also aus der Normalgleichungsmatrix \mathbf{N}) ergeben.

Aus den Beobachtungsgleichungen (4.26) wird deutlich, dass die Änderungen in den Gradienten der Reflexionsfaktoren den größten Einfluss auf die Funktionalmatrix und damit auch auf das Ergebnis und dessen stochastische Eigenschaften haben. Anschaulich formuliert: Die Genauigkeit der Bildzuordnung hängt von Kontrastunterschieden (Gradienten) ab. Diese ermöglichen also eine Gewichtung ähnlich wie oben beschrieben, vgl. auch HEIPKE (1990) oder FUA & LECLERC (1995). Sie bieten aber in Verbindung mit der Regularisierung mittels Gleichungen (4.28) und (4.29) den Vorteil, dass in X- und Y-Richtung unter-

²² Nach WROBEL et al. (1992) bietet bei der Gleichgewichtung aller Bedingungen die adaptive Regularisierung Vorteile gegenüber der krümmungsminimierenden Regularisierung. Dies ist durch die dann mögliche sukzessive Anpassung auch an stärkere Knicke über mehrere Iterationen erklärbar, sollte aber bei individuell gewichteter (krümmungsminimierender) Regularisierung nicht von Bedeutung sein.

schiedlich gewichtet werden kann. Dieser neue Ansatz wird für die Modellierung der Mars-Oberfläche ausgenutzt.

Für die Bestimmung des Regularisierungsparameters λ_{Reg} existiert eine Reihe unterschiedlicher Verfahren (siehe Vergleiche von FISCHER & HEGLAND 1999 oder LINKE 2004), die teils auch stark unterschiedliche Werte liefern. Aus zwei Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit die Varianzkomponentenschätzung angewendet:

1. Der berechnete Regularisierungsparameter ist nicht vom Genauigkeitsniveau der Bedingungen abhängig, da er anhand von Varianzkomponenten, die aus der Ausgleichung resultieren, angepasst wird. Dies ist besonders wichtig, weil zwar die relativen Gewichte zwischen den Bedingungen aus den Grauwertgradienten vorliegen, aber die globale Relation zur Bildzuordnung (zunächst) unbekannt ist.
2. Die Varianzkomponentenschätzung benötigt im Vergleich zu anderen Verfahren keine Berechnungsreihen, um anschließend die optimale Regularisierung zu finden, sondern lediglich einen Iterationsschritt, um das Startgewicht anhand der Ausgleichungsergebnisse zu korrigieren. Sie bietet also in Anbetracht der langen Rechenzeit der Oberflächenmodellierung auch deutliche Zeitvorteile.

Der Regularisierungsparameter wird während der Oberflächenmodellierung in jedem Iterationsschritt angepasst. Da die Berechnung kein klassisches Ausgleichungsproblem darstellt und die Pseudo-Beobachtungen für jede Iteration neu berechnet werden, wird sich der Parameter jeweils (leicht) ändern.

4.7 Verknüpfung von Facetten-Stereosehen und Photoklinometrie

Durch den beschriebenen Regularisierungsansatz mit Glattheitsbedingungen werden texturarme Bereiche, in denen keine zuverlässige Bildzuordnung möglich ist, stabilisiert (geglättet). Dass die für den Zuordnungsprozess notwendigen Gradienten hier (nahezu) 0 sind, bedeutet aber nicht, dass keine Informationen vorliegen – für jedes einzelne Bildpixel wird schließlich ein Reflexionsfaktor beobachtet. Es liegt also nahe, nicht nur die Gradienten der Reflexionsfaktoren sondern auch die Reflexionsfaktoren selbst für die DGM-Berechnung auszunutzen und die Bildzuordnung nach dem Facetten-Stereosehen um die Photoklinometrie zu erweitern.

Die Modellierung muss von der Entstehung der Messwerte entsprechend Gleichung (3.1) und einem geeigneten Reflexionsmodell der Mars-Oberfläche (Abschnitt 3.6) ausgehen. Dazu sei in diesem Teilabschnitt beispielhaft das Lambertsche Kosinusetz (3.57) angesetzt. Dann gilt:

$$R_{\text{HRSC}} = A f(\theta_i, \theta_r, \text{Material}) \exp\left(-\frac{\tau}{\cos \theta_{r(\text{Niveau})}}\right) + \Delta R_A = A \cos \theta_i \exp\left(-\frac{\tau}{\cos \theta_{r(\text{Niveau})}}\right) + \Delta R_A \quad (4.33)$$

Dieser Ansatz liegt auch dem Shape-from-Shading-Verfahren von DORRER et al. (2005) zur Auswertung von HRSC-Daten zugrunde, bei dem der (in der Regel am höchsten aufgelöste) Nadirkanal verwendet wird. Mit der Annahme einer konstanten optischen Dichte der Atmosphäre über einem entsprechend kleinen Bearbeitungsgebiet, sodass auch die Beobachtungsrichtung und damit der Winkel $\theta_{r(\text{Niveau})}$ nahezu konstant sind (vgl. Betrachtungen im Abschnitt 5.2.2), lässt sich vereinfacht schreiben:

$$R_{\text{HRSC}} = B \cos \theta_i + \Delta R_A \quad (4.34)$$

Die Parameter B und ΔR_A können aus den Bilddaten abgeleitet werden: ΔR_A entspricht dem Reflexionsfaktor im Schatten (siehe Abschnitt 4.8.1.2) und B lässt sich z.B. aus dem Reflexionsfaktor ebener Gebiete, entsprechend dem Lambert-Gesetz durch den Kosinus des bekannten Sonnenwinkels $\theta_{i(\text{Niveau})}$ dividiert,

bestimmen. Die Trennung der multiplikativen Oberflächen- und Atmosphäreinflüsse ist für die reine DGM-Bestimmung nicht notwendig.

In Gleichung (4.34) verbleiben so lediglich die Bestrahlungswinkel θ_i als Unbekannte, die den Winkeln zwischen der Bestrahlungsrichtung (Sonnenvektor \vec{s}) und den lokalen Oberflächennormalen \vec{n} entsprechen. Es gilt:

$$R_{\text{HRSC}} = B \cos \theta_i + \Delta R_A = B \frac{\vec{s} \cdot \vec{n}}{|\vec{s}| |\vec{n}|} + \Delta R_A \quad (4.35)$$

Entsprechend (4.14) können die lokalen Normalenvektoren als Funktion der Lagekoordinaten (X^0, Y^0) und der unbekannt Höhen Z geschrieben werden. Die Sonnenvektoren (s_X, s_Y, s_Z) sind bekannt und bereits normiert. Die (nichtlinearen) Beobachtungsgleichungen für eine vermittelnde Ausgleichung auf Basis der Photoklinometrie resultieren schließlich analog zu denen der Bildzuordnung (4.26) durch bilineare Interpolation der einzelnen Surfel aus den unbekannt Höhen der Stützstellen:

$$R_{\text{HRSC}} = B \frac{-s_X \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \frac{\partial \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\partial X^0} Z_{ij} - s_Y \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \frac{\partial \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\partial Y^0} Z_{ij} + s_Z}{\sqrt{\left[\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \frac{\partial \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\partial X^0} Z_{ij} \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \frac{\partial \alpha_{ij}(X^0, Y^0)}{\partial Y^0} Z_{ij} \right]^2} + 1} + \Delta R_A \quad (4.36)$$

Gleichung (4.36) stellt über die Normalenvektoren, d.h. die lokalen Neigungen der einzelnen Facetten, indirekt Bedingungen an die Höhen. Da so keine absoluten Höhen bestimmbar sind, bestünde für eine separate Ausgleichung ein Datumsdefekt²³, weshalb Photoklinometrie bzw. Shape-from-Shading zumeist verwendet werden, um ein bereits existierendes Höhenmodell zu verfeinern wie beispielsweise in den Ansätzen von DORRER et al. (2005) oder KIRK et al. (2006). Das Datumsproblem wird in diesem Rahmen durch die Verknüpfung mit der Bildzuordnung gelöst. Darüber hinaus werden so auch die Vorteile beider Modellierungen optimal ausgenutzt: Bildzuordnung kann zuverlässige Höhen für kontrastreiche Bildabschnitte liefern, welche durch Photoklinometrie in kontrastärmeren Gebieten ergänzt werden. Hier wird die Flexibilität des objektraumbasierten Ansatzes des Facetten-Stereosehens deutlich: Eingangsgrößen (Bildraten) und Ergebnis (DGM) sind für Bildzuordnung und Photoklinometrie jeweils gleich, sodass das gemeinsame Ausgleichungsmodell die Beobachtungsgleichungen (4.26) und (4.35) umfasst. Die Bildzuordnung basiert auf allen radiometrisch angepassten Bildern, die Photoklinometrie nach dem oben dargelegten Ansatz auf dem radiometrisch unveränderten Nadirbild der HRSC (Abbildung 4.8).

Die (ausschließliche) Modellbildung nach (4.35), angewendet auf mehrere Bilder, ist bereits von WROBEL (1989) als Verallgemeinerung des Facetten-Stereosehens vorgeschlagen worden. Sie wurde als Mehrbild-Shape-from-Shading-Methode von HEIPKE (1992), PIECHULLEK (2000) und LOHSE et al. (2006) unter Verwendung unterschiedlicher Reflexionsmodelle weiterentwickelt, wobei das Korrespondenzproblem zwischen den Bildern implizit gelöst und so das vertikale Datum mitbestimmt werden kann.

In dieser Arbeit werden Bildzuordnung (von Gradienten aus radiometrisch angepassten Daten) und Photoklinometrie (auf Basis radiometrisch unveränderter Beobachtungen) explizit formuliert. So wird die geometrische Korrespondenz zwischen den Bildern und damit die Bestimmung absoluter Höhen nicht

²³ Dies gilt streng nur für die Photoklinometrie auf Basis eines Bildes. Mit einer Mehrbild-Shape-from-Shading-Methode nach Gleichung (4.35) kann unter gewissen Bedingungen wie unterschiedlichen Bestrahlungsrichtungen auch die absolute Höhe bestimmt werden (WROBEL 1989, HEIPKE 1992). Signifikant unterschiedliche Bestrahlung ist allerdings in einem HRSC-Bildstreifen nicht gegeben.

durch fehlerhaft oder unzureichend parametrisierte Reflexionsvorgänge an der Mars-Oberfläche und in der Atmosphäre beeinflusst (s.u.). Auch kann die Photoklinometrie hier auf ein oder mehrere Bilder angewendet werden, wobei Bedingungen wie unterschiedliche Bestrahlung (vgl. WROBEL 1989 und HEIPKE 1992) nicht relevant sind. Schließlich ermöglicht die Trennung in „geometrische“ und „radiometrische“ Beobachtungsgleichungen, (4.26) und (4.36), die individuelle Steuerung der Gewichtung in der gemeinsamen Ausgleichung. Dabei kann die Photoklinometrie als Regularisierungsansatz aufgefasst werden, bei dem Bedingungen an die DGM-Neigung aus den Bilddaten selbst formuliert sind. Photoklinometrie sollte den Bildzuordnungsprozess genau dort stabilisieren, wo es nötig ist. Dies wird durch die texturabhängige Gewichtung dieser Beobachtungsgleichungen analog zu der im Abschnitt 4.6.3 beschriebenen Gewichtung der Regularisierung mit Glattheitsbedingungen erzielt.

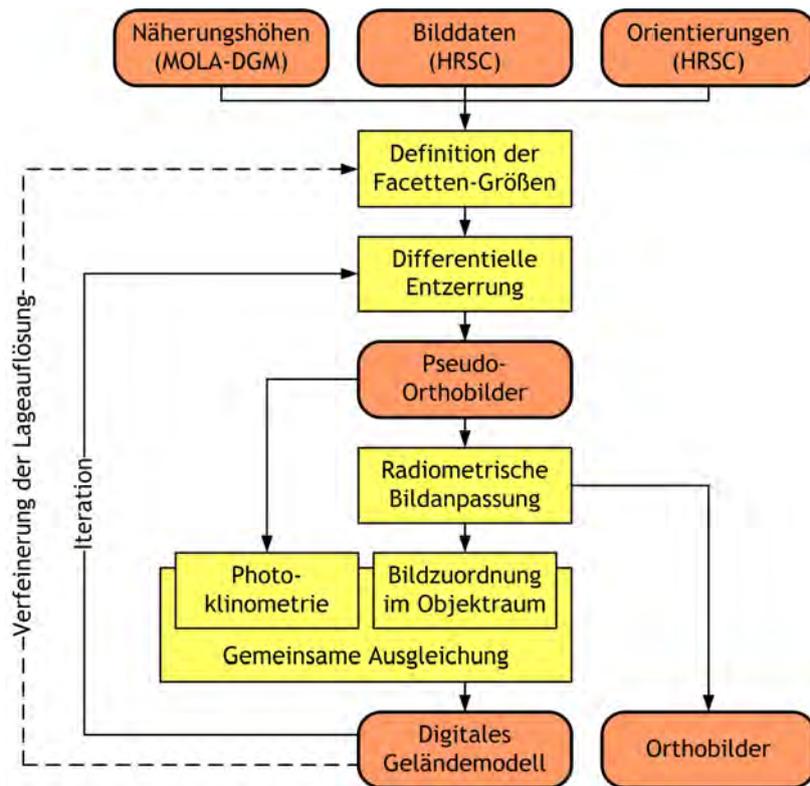


Abbildung 4.8: Verknüpfung von Bildzuordnung und Photoklinometrie.

Grundsätzlich gilt für die Photoklinometrie, dass fehlerhafte radiometrische Parameter systematische Fehler in der Geometrie nach sich ziehen. Anhand von Gleichung (4.34) wird deutlich, dass der Luftlichtparameter ΔR_A die Dynamik beeinflusst: Ein zu großer Wert führt zur Überhöhung (Neigungen werden verstärkt), ein zu kleiner Wert zur Stauchung (Neigungen werden reduziert). Fehler im Faktor B bewirken in erster Näherung eine Verkippung des gesamten DGMs, da sie durch die Bestrahlungswinkel und damit durch systematische Änderungen der Normalenvektoren kompensiert werden müssen. Im Zusammenhang mit dem Facetten-Stereosehen wird diesen Effekten zwar durch Bildzuordnung entgegengewirkt, dennoch können sie sich bemerkbar machen und besonders in texturarmen Regionen zu Modellverbiegungen führen.

Die Verknüpfung von Facetten-Stereosehen und Photoklinometrie ist nicht an das Lambertsche Kosinusetz gebunden und kann prinzipiell mit beliebigen Reflexionsmodellen erfolgen. Umfassen sie allerdings mehrere freie Parameter, gestaltet sich die Vorabbestimmung aus den Bilddaten komplizierter. Sie können jedoch, wie nachfolgend gezeigt, in den Ausgleichungsansatz integriert werden.

4.8 Integrierte geometrische und radiometrische Modellierung

Die systematische Bildaufnahme der HRSC aus unterschiedlichen Blickwinkeln innerhalb eines Orbits sollte nicht nur für den Bildzuordnungsprozess sondern auch für die Photoklinometrie ausgenutzt werden. Durch die Ableitung von Reflexionsparametern innerhalb der gemeinsamen Ausgleichung lässt sich schließlich das Ziel der integrierten geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche realisieren. Eine Grundvoraussetzung dafür ist die Trennung von Oberflächen- und Atmosphäreinflüssen.

Die Integration der radiometrischen Modellierung stellt auch insofern eine Erweiterung der oben genannten, von PIECHULLEK (2000) und LOHSE et al. (2006) umgesetzten Mehrbild-Shape-from-Shading-Methode dar, dass keine Vorkenntnisse über die Reflexionsparameter notwendig sind. Oberflächen- und Atmosphärenmodelle werden vollständig aus den Daten der HRSC auf *Mars Express* abgeleitet.

4.8.1 Bestimmung und Korrektur des Atmosphäreinflusses

Mit dem Ziel der Beschreibung der Mars-Oberfläche durch die Reflexionsfaktoren R_{Mars} ist es notwendig, den Atmosphäreinfluss zu bestimmen und die Bilddaten (Pseudo-Orthobilder) R_{HRSC} entsprechend zu korrigieren – vgl. Abschnitt 3.2 zur Entstehung der Messwerte. Die Modellierung der Mars-Atmosphäre stellt ein komplexes Thema dar, was nicht zuletzt dadurch belegt wird, dass sich eine eigene Arbeitsgruppe innerhalb des *HRSC Science Teams* ausschließlich damit beschäftigt (z.B. MARKIEWICZ et al. 2004, 2005, HOEKZEMA 2009 oder HOEKZEMA et al. 2007, 2009).

4.8.1.1 Optische Dichte

In Anbetracht der Aufnahme einer HRSC-Sequenz innerhalb weniger Minuten (vgl. Abschnitt 5.2) erscheint es zulässig, die optische Dichte der Atmosphäre – die Dämpfung durch Absorption und Streuung, die vor allem in dichten und damit bodennahen Schichten auftritt – über dem nur wenige Kilometer großen Auswertebereich als konstant anzunehmen.²⁴ Dennoch vorhandene Unterschiede in den atmosphärisch korrigierten HRSC-Bildern werden so als anisotrope Oberflächeneigenschaften interpretiert.

Zur Bestimmung der optischen Dichte τ bieten sich die Schattenmethode (*shadow method*; MARKIEWICZ et al. 2005), bei der Oberflächen- und Atmosphäreinflüsse aus dem Helligkeitsvergleich zwischen Schatten und benachbarten beleuchteten Flächen bestimmt werden, und die Stereomethode (*stereo method*; HOEKZEMA et al. 2007, HOEKZEMA 2009) an. Aufgrund ihres höheren Genauigkeitspotentials (vgl. HOEKZEMA et al. 2007) wird hier die Stereomethode weiter verfolgt. Sie macht sich die systematische Stereoaufnahme der HRSC innerhalb eines Orbits zunutze: Liegen mehrere Bilder mit unterschiedlichen Beobachtungswinkeln vor, kann mittels Gleichung (3.1) die optische Dichte bestimmt werden, indem die aus unterschiedlich langen Atmosphärendurchgängen resultierenden Kontrastunterschiede ausgenutzt werden. Eine Möglichkeit zur Berechnung des Bildkontrastes ist die Standardabweichung der Reflexionsfaktoren $\sigma(R)$. Dann gilt:

$$\sigma(R_{\text{HRSC}}) = \sigma\left(R_{\text{Mars}} \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta_{r(\text{Niveau})}}\right) + \Delta R_A\right) \approx \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta_{r(\text{Niveau})}}\right) \sigma(R_{\text{Mars}}) \quad (4.37)$$

²⁴ Würden allerdings Daten aus unterschiedlichen Orbits verwendet, müsste zu jedem Aufnahmezeitpunkt ein eigenes Atmosphärenmodell bestimmt werden.

Wird dieser Zusammenhang für zwei Bilder mit (möglichst großen) Beobachtungswinkeldifferenzen – im Fall der HRSC der Nadir R_{ND} und ein Stereokanal R_S – aufgestellt, erhält man nach Gleichsetzen und Logarithmieren:

$$\tau_{ND-S} \approx \frac{\cos \theta_{r(Niveau),ND} \cos \theta_{r(Niveau),S}}{\cos \theta_{r(Niveau),ND} - \cos \theta_{r(Niveau),S}} \ln \left(\frac{\sigma(R_{ND}) / \langle R_{ND} \rangle}{\sigma(R_S) / \langle R_S \rangle} \right) \quad (4.38)$$

Die mittleren Reflexionsfaktoren $\langle R_{ND} \rangle$ und $\langle R_S \rangle$ ermöglichen eine Normierung der Kontraste.

Die praktische Bestimmung der optischen Dichte aus HRSC-Daten ist nicht trivial: Die Atmosphäre kann teilweise lokale Schwankungen zeigen, insbesondere wenn der betrachtete Oberflächenabschnitt eine große Reliefenergie aufweist. Die Voraussetzung einer konstanten optischen Dichte ist dann nicht gegeben. Zudem bedeuten Beobachtungswinkeldifferenzen von etwa 20° nur geringe Unterschiede in den Atmosphärendurchgängen, die im Zusammenhang mit dem Datenumfang von 6-7 Bit – was die Kontrastmessung erschwert – dazu führen, dass die berechneten optischen Dichten unzuverlässig bzw. fehlerhaft sein können. HOEKZEMA et al. (2009) schlagen daher vor, für mehrere manuell gewählte Bildausschnitte die optische Dichte aus dem Nadir R_{ND} und jedem der beiden Stereobilder R_{S1} und R_{S2} zu berechnen, diese Werte zu vergleichen und die beiden Berechnungen mit der geringsten Differenz zu mitteln:

$$\tau = \frac{\tau_{ND-S1} + \tau_{ND-S2}}{2} \quad (4.39)$$

Für die Anwendung in diesem Rahmen wird ein darauf aufbauendes, automatisiertes Vorgehen angewendet, indem ein Bildausschnitt systematisch über das Auswertgebiet wandert und die besten Resultate mehrerer Teilgebiete gewichtet in das Endergebnis einfließen.

Die einzelnen Ergebnisse lassen sich anhand des Qualitätsfaktors

$$q_\tau = \frac{2\sigma(R_{ND}) - \sigma(R_{S1}) - \sigma(R_{S2})}{|\sigma(R_{S1}) - \sigma(R_{S2})|} \quad (4.40)$$

beurteilen; er dient daher auch als Gewicht bei der Mittelwertbildung über die Teilgebiete. Der Faktor wird besonders groß, wenn die Stereokanäle einen ähnlichen Kontrast aufweisen und dieser zudem geringer als der des Nadirkanals ist. Eine optische Dichte kann als zuverlässig betrachtet werden, wenn – in Kombination mit hohem Bildkontrast – gilt: $q_\tau \gg 1$, wobei aus praktischen Erfahrungen mit HRSC-Daten bereits Werte ab $q_\tau > 3$ akzeptabel sind (HOEKZEMA 2008, HOEKZEMA et al. 2009).

Anhand der so bestimmten optischen Dichte lassen sich die HRSC-Bilddaten um den multiplikativen Anteil der Atmosphäre entsprechend Gleichung (3.1) korrigieren. Grundvoraussetzung ist allerdings eine zuverlässige Bestimmung, da sich Fehlereinflüsse direkt auf die anschließende Oberflächenmodellierung auswirken.

4.8.1.2 Luftlicht

Luftlicht, das von der Atmosphäre in Richtung des Sensors gestreut wird, hat eine Aufhellung der Bilddaten zur Folge, wobei helle und dunkle Bildpartien gleichermaßen betroffen sind. Eine Möglichkeit zur Bestimmung dieses additiven Anteils ΔR_A an den Reflexionsfaktoren R_{HRSC} besteht daher in der Analyse von Schlagschatten. Hier ist die Oberfläche dunkel und es gilt: $R_{Mars} = 0$, womit sich die Gleichung (3.1) für Schattenbereiche ableiten lässt:

$$R_{HRSC-Schatten} = \Delta R_{A-Schatten} \quad (4.41)$$

Da die Formel die diffuse Bestrahlung durch Himmelslicht und auch Mehrfachreflexionen an der Oberfläche – z.B. an gegenüberliegenden Rändern von Einschlagkratern oder Tälern – nicht berücksichtigt, ist in der Praxis eine sorgfältige Messung, möglichst in mehreren Schattenbereichen des Bildes, notwendig.

Die Methode wird von DORRER & KIRK (2007) zur Auswertung von HRSC-Daten mit dem von DORRER et al. (2005) entwickelten Shape-from-Shading-Ansatz verwendet.

Für die vollständige Oberflächenmodellierung im Rahmen dieser Arbeit wird die Korrektur in den Ausgleichungsansatz (Abschnitt 4.8.3) integriert.

4.8.2 Ableitung von Reflexionseigenschaften der Oberfläche

In den im Abschnitt 3.6 dargestellten Reflexionsgesetzen wird der Reflexionsfaktor jeweils als Funktion der material- bzw. oberflächenbeschreibenden Parameter in Abhängigkeit von der Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie formuliert. Diese hängt wiederum von den lokalen Oberflächennormalen, also dem DGM, ab. Ist das DGM bekannt, können die Reflexionsparameter in einer vermittelnden Ausgleichung aus den von der HRSC beobachteten, atmosphärisch korrigierten Reflexionsfaktoren geschätzt werden. Ein Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung des Reflexionsmodells von Hapke. In diesem Fall folgen die Beobachtungsgleichungen aus (3.61) für das vollständige Modell bzw. aus (3.63) ohne die Mitbestimmung des Oppositionseffektes, ergänzt um die bilineare Interpolation in den Facetten der einzelnen Modellparameter entsprechend Gleichung (4.12). Letztere entfällt, wenn die radiometrischen Oberflächeneigenschaften innerhalb des bearbeiteten (kleinen) Fensters als konstant angenommen werden können.

So können die Parameter des Hapke-Modells oder eines anderen, empirischen Gesetzes im Anschluss an die DGM-Berechnung aus den (Pseudo-)Orthobildern der einzelnen HRSC-Kanäle in einer vermittelnden Ausgleichung geschätzt werden.

Für die Bestimmung richtungsabhängiger Reflexionseigenschaften spielt die DGM-Qualität eine entscheidende Rolle. In Anbetracht dessen liegt es nahe, beide Objektmodelle, wie nachfolgend dargelegt, gemeinsam iterativ zu verfeinern.

4.8.3 Der integrierte Ausgleichungsansatz

Durch die im obigen Abschnitt 4.7 beschriebene Verknüpfung von Facetten-Stereosehen und Photoklinometrie lässt sich das Ziel einer wirklich gemeinsamen geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten verwirklichen: Sofern das Bearbeitungsgebiet eine gewisse Reliefenergie aufweist und die Bildzuordnung zuverlässige absolute Höhen liefert, kann die für die Photoklinometrie notwendige radiometrische Korrektur der Bilddaten auf der Basis von Gleichung (3.1) innerhalb der Ausgleichung mitbestimmt werden. Durch die Verwendung mehrerer HRSC-Kanäle lassen sich richtungsabhängige Reflexionseigenschaften modellieren. Ergebnisse sind das DGM, materialspezifische Parameter der Oberfläche sowie die additive Korrektur der Bilddaten um den Luftlichtanteil. Die optische Dichte der Atmosphäre wird aufgrund der diskutierten Genauigkeit der Stereomethode für HRSC-Daten vorab bestimmt. Dies ermöglicht die von den anderen Parametern unabhängige Qualitätsbeurteilung – vor allem in Anbetracht der Tatsache, dass die Dämpfung der Atmosphäre für kleine Beobachtungswinkel ähnlich ist und daher stark mit dem Albedofaktor des Reflexionsmodells korreliert. Die vorhergehende Bestimmung der optischen Dichte ermöglicht eine zuverlässigere Trennung der multiplikativen Einflüsse der Oberfläche (Albedo) und Atmosphäre.

Grundsätzlich kann die Berechnung mit jedem Reflexionsmodell erfolgen. Liegt der Schwerpunkt auf der DGM-Berechnung, kann unter Umständen ein einfaches radiometrisches Modell wie das Lambert-Gesetz in Gleichung (4.34) gewählt werden (vgl. dazu KIRK 1987). Die möglichst vollständige Oberflächenmodellierung sollte jedoch auf einem dementsprechend detaillierteren Ansatz basieren, also prinzipiell auf dem Modell von Hapke. In Anbetracht seiner Komplexität und der teils stark korrelierten Parameter erscheint

es jedoch für die Verwendung in der Photoklinometrie nur schwer handhabbar.²⁵ Es lässt sich zeigen, dass das Modellverhalten durch das einfachere, empirische Lunar-Lambert-Gesetz (3.59) approximiert werden kann – vgl. Abschnitt 5.4. Damit lässt sich Gleichung (3.1) schreiben:

$$R_{\text{HRSC}} = A_N \left[2L \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} + (1-L) \cos \theta_i \right] \exp \left(-\frac{\tau}{\cos \theta_{r(\text{Niveau})}} \right) + \Delta R_A \quad (4.42)$$

Analog zum Ansatz in (4.35) wird der Bezug zur Objektgeometrie über die lokalen Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel als Skalarprodukte zwischen den Normalenvektoren \vec{n} der DGM-Facetten und den Sonnenvektoren \vec{s} bzw. den Beobachtungsrichtungen \vec{v} hergestellt:

$$R_{\text{HRSC}} = A_N \left[2L \frac{\frac{\vec{s} \cdot \vec{n}}{|\vec{s}| |\vec{n}|}}{\frac{\vec{s} \cdot \vec{n}}{|\vec{s}| |\vec{n}|} + \frac{\vec{v} \cdot \vec{n}}{|\vec{v}| |\vec{n}|}} + (1-L) \frac{\vec{s} \cdot \vec{n}}{|\vec{s}| |\vec{n}|} \right] \exp \left(-\frac{\tau}{\cos \theta_{r(\text{Niveau})}} \right) + \Delta R_A \quad (4.43)$$

Werden analog zum Übergang von Formel (4.35) zu (4.36) die lokalen Normalenvektoren wiederum als Funktionen der Lagekoordinaten und der unbekanntenen Höhen ausgedrückt und weiterhin die bilineare Interpolation zwischen den DGM-Stützstellen eingebunden, liegen die Beobachtungsgleichungen für die Photoklinometrie unter Mitbestimmung der radiometrischen Parameter vor. Letztere sind in Gleichung (4.43) innerhalb des Bearbeitungsfensters vorerst als konstant angenommen (siehe dazu Abschnitt 6.7). Die Unbekannten der radiometrischen Oberflächenmodellierung sind die Normalalbedo A_N und der Gewichtsparameter L , die grundsätzlich phasenwinkelabhängig und daher für jedes HRSC-Bild anzusetzen sind. Auch der Luftlichteinfluss ist vom Phasenwinkel abhängig, was die Analyse von HRSC-Daten bestätigt: Reflexionsfaktoren in den Schattenbereichen, welche nach Gleichung (4.41) dem additiven Term ΔR_A entsprechen, zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Bildern eines Orbits. Deshalb muss auch ΔR_A individuell bestimmt werden.

Das Ausgleichungsmodell der integrierten geometrischen und radiometrischen Modellierung umfasst das Facetten-Stereosehen mit der Funktionalmatrix A nach Gleichung (4.27), das vom Aufbau her analoge Modell der Photoklinometrie A_{Phot} mit der radiometrischen Parametrisierung A_{Rad} sowie die Regularisierung durch A_{Reg} nach (4.31). Beobachtungen sind die Bilddaten im Vektor l – für die Photoklinometrie im Original, für die Bildzuordnung durch lineare Transferfunktionen angepasst – sowie die zur Regularisierung notwendigen Vorgaben l_{Reg} an die Glattheit. Damit lautet das vollständige Ausgleichungsmodell:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ l_{\text{Phot}} \\ l_{\text{Reg}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ v_{\text{Phot}} \\ v_{\text{Reg}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(Z) & 0 \\ A_{\text{Phot}}(Z) & A_{\text{Rad}}(A_N, L, \Delta R_A) \\ A_{\text{Reg}}(Z) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ A_N \\ L \\ \Delta R_A \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

$$C = \sigma_0^2 \text{ a priori} \begin{bmatrix} Q_{\text{ll}} & & 0 \\ & \frac{1}{\lambda_{\text{Phot}}^2} Q_{\text{Phot}} & \\ 0 & & \frac{1}{\lambda_{\text{Reg}}^2} Q_{\text{Reg}} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

²⁵ Ein Versuch zur eindimensionalen, grob aufgelösten Photoklinometrie unter Verwendung des Hapke-Modells wurde beispielsweise von REBHAN (1993) unternommen.

Die Kofaktorenmatrizen Q_{Phot} und Q_{Reg} sind vom Prinzip her gleich aufgebaut, unterscheiden sich aber in ihrer Dimension, da Q_{Phot} in jedem Surfel und Q_{Reg} richtungsabhängig in jeder DGM-Stützstelle formuliert wird.

Der schematische Ablauf der integrierten Oberflächenmodellierung ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die Ableitung von Materialeigenschaften der Mars-Oberfläche anhand des Hapke-Modells erfolgt im Anschluss daran.

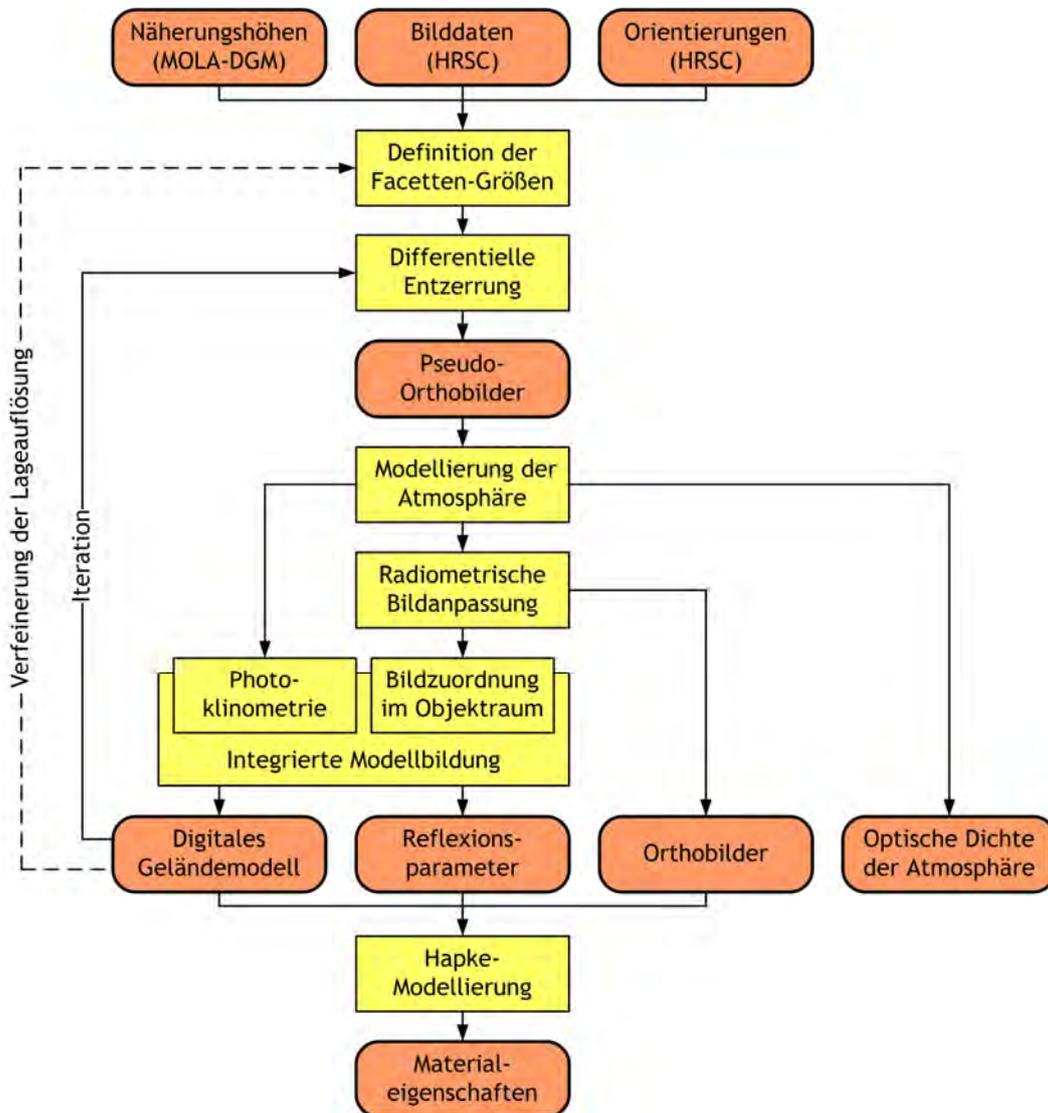


Abbildung 4.9: Integrierte geometrische und radiometrische Modellierung.

4.9 Zusammenfassung des Modellierungsansatzes

Im Kapitel 4 wird das photogrammetrische Verfahren des Facetten-Stereosehens sukzessive erweitert, sodass geometrische und radiometrische Oberflächeneigenschaften gemeinsam bestimmt werden können. Charakteristisch sind dabei die Verlagerung des Zuordnungsprozesses vom Bildraum in den Objektraum – basierend auf der gesamten Bildinformation – sowie die Verknüpfung mit der Photoklinometrie. Der Gesamtansatz lässt sich in vier aufeinander aufbauende Modellierungsansätze gliedern:

- **Facetten-Stereosehen** nach dem indirekten Ansatz entsprechend WEISENSEE (1992)
- **Regularisierter Ansatz** durch Glattheitsbedingungen an das DGM
- Verknüpfung von Facetten-Stereosehen und Photoklinometrie (**Photoklinometrie-Ansatz**)
- **Integrierter Ansatz** unter Mitbestimmung der radiometrischen Parameter

Ergebnisse der ersten drei Verfahren, welche jeweils Teile des integrierten Ansatzes umfassen, sind ein DGM der Mars-Oberfläche und Orthobilder der einzelnen HRSC-Kanäle (bzw. ein Mittelbild). Im integrierten Ansatz werden DGM, Orthobilder, Parameter empirischer Reflexionsmodelle und zugleich auch der (additive) Einfluss der Mars-Atmosphäre innerhalb einer gemeinsamen Ausgleichung geschätzt.

Die Anwendung des Grundansatzes des Facetten-Stereosehens ist zweckmäßig, wenn ein niedrig aufgelöstes DGM bestimmt werden soll; bei ausreichender Bildtextur lässt sich vergleichsweise schnell ein Ergebnis erzielen. Gleichzeitig entstehen qualitativ hochwertige Orthobilder.²⁶ Für ein hochauflösendes DGM wird die Stabilisierung der Berechnung notwendig, d.h. die Einführung von Glattheitsbedingungen im regularisierten Ansatz bzw. die Verknüpfung mit der Photoklinometrie. Für die Mitbestimmung von Reflexionseigenschaften im integrierten Ansatz sind die Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie und damit die DGM-Qualität essentiell. Dieser Ansatz ist also nur bei entsprechend hoher (End-)Auflösung, also für eine wirklich detaillierte geometrische und radiometrische Modellierung der Oberfläche, geeignet.

Damit lässt sich ein zweckmäßiges Vorgehen bei der vollständigen Oberflächenmodellierung ableiten, indem die Auflösung und damit einhergehend der Modellierungsansatz entsprechend der obigen Reihenfolge schrittweise verfeinert werden. Die berechneten Modelle bilden jeweils die Startwerte für den folgenden Schritt. Der Übergang vom reinen Facetten-Stereosehen zum regularisierten Ansatz ist dabei unkritisch, die fiktiven Zusatzbedingungen werden mit Hilfe der Varianzkomponentenanalyse optimal gegenüber der eigentlichen Information gewichtet. Grundsätzlich kann die Berechnung bereits in der größten Facettierungsstufe regularisiert werden. Mit größerer Sorgfalt ist der Übergang zum Photoklinometrie-Ansatz anzugehen. Das radiometrische Modell muss nicht nur die Oberfläche, sondern auch die Atmosphäre geeignet beschreiben können. Ein unzureichender oder gar falscher Ansatz resultiert direkt in fehlerhaften Höhen, insbesondere dort, wo die Bildzuordnung schlecht kontrolliert ist und demzufolge die Photoklinometrie höher gewichtet wird. Hier zeigt sich der entscheidende Vorteil der Verknüpfung von Facetten-Stereosehen und Photoklinometrie, was einhergehend mit einer hohen DGM-Auflösung die Mitbestimmung radiometrischer Oberflächen- und Atmosphäreneigenschaften im integrierten Ansatz ermöglicht. Eine geeignete Modellierung vorausgesetzt, können die Parameter implizit anhand zuverlässiger absoluter Höhen mit abgeleitet werden. Entscheidend ist dabei die Festlegung eines zweckmäßigen Gültigkeitsbereiches für die materialbeschreibenden Parameter, da nicht modellierte lokale Änderungen der Reflexionseigenschaften Fehler in der Topographie hervorrufen.

Die vollständige Oberflächenmodellierung beginnt mit einem relativ grob facettierten DGM, welches mit dem regularisierten Ansatz abgeleitet wird. Mit kleiner werdenden Facetten und einem entsprechend genaueren geometrischen Modell kann schließlich zum integrierten Ansatz und damit zur Mitbestimmung radiometrischer Eigenschaften übergegangen werden. Führt der Ansatz zu einer (radiometrischen) Überparametrisierung – beispielsweise in wenig bewegtem Gelände –, bietet es sich an, auf bekannte oder vorab bestimmte Modellparameter zurückzugreifen. So können lokale Variationen der Reflexionseigenschaften auf Basis eines ausschließlich aus Bildzuordnung bestimmten DGMs abgeleitet und dann im

²⁶ Voraussetzung dafür ist, dass die Lageauflösung des DGMs zur Modellierung des Geländes in gut texturierten Bildbereichen ausreicht, sodass hier geringe Lageversätze entstehen. In kontrastarmen Gebieten wird ein solches DGM zwar ein starkes Rauschverhalten zeigen, die Auswirkungen allerdings sind in den Orthobildern nicht erkennbar.

integrierten Ansatz festgehalten werden. Für die radiometrische Oberflächenmodellierung wird hier das Lunar-Lambert-Modell angesetzt, da es das Hapke-Gesetz gut approximiert. Die Parameter dieses komplexeren Modells können im Anschluss berechnet werden, um so den Bezug zu Materialeigenschaften herzustellen (vgl. Ablaufplan in Abbildung 4.9).

Ist ein Bearbeitungsgebiet aus mehreren Einzelfenstern aufgebaut, sollten sich diese überlappen, um bei der Mosaikbildung die Modelle im Übergangsbereich aus benachbarten Fenstern mitteln zu können. Da die Randbereiche naturgemäß schlechter bestimmt sind, sollte diese Berechnung entsprechend der Entfernung vom Rand gewichtet werden.²⁷

4.10 Implementierung

Der in diesem Kapitel beschriebene Modellierungsansatz einschließlich der Mosaikierung der abgeleiteten Objektmodelle ist für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit in der Programmiersprache MATLAB implementiert. Durch die in die Programmierumgebung integrierten Visualisierungswerkzeuge bieten sich umfangreiche Möglichkeiten zur Analyse der Ergebnisse in der praktischen Anwendung auf HRSC-Daten – vgl. nachfolgende Kapitel 5 und 6.

²⁷ Dazu sei angemerkt, dass die im Rahmen dieser Arbeit angewendete Objektrepräsentation durch Bilinearfacetten grundsätzlich stetig aber nicht knickfrei ist. Dennoch würde beispielsweise die einfache Mittelbildung in den Überlappungsbereichen eines DGMs teilweise zu nicht plausiblen Neigungsänderungen im Gelände führen, obwohl die entsprechenden Höhen innerhalb ihrer Fehlertoleranzen übereinstimmen.

5 Untersuchungen und Überlegungen zur Modellierung der Mars-Oberfläche

Die Parametrisierung des im vorangegangenen Kapitel abgeleiteten Ansatzes für die Oberflächenmodellierung aus Daten der HRSC auf *Mars Express* hängt entscheidend von der Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie, von den Reflexionseigenschaften der Oberfläche und der Atmosphäre sowie von den radiometrischen und geometrischen Eigenschaften der Bilddaten ab. Aufbauend auf diesbezügliche Überlegungen wird – unter der Annahme, dass das Hapke-Modell die bestmögliche radiometrische Beschreibung der Mars-Oberfläche darstellt – untersucht, wie die Hapke-Parameter zusammenhängen und unter welchen Voraussetzungen diese bestimmbar sind. Für die Photoklinometrie und damit für die geometrische Modellierung wird die Qualität der Hapke-Approximation durch das Lunar-Lambert-Modell abgeschätzt. Dieses Kapitel gibt damit auch einen umfassenden Überblick über die Möglichkeiten der Hapke-Modellierung aus HRSC-Daten.

Abschließend werden Verfahren zur Analyse der in diesem Rahmen bestimmten (Zwischen-)Ergebnisse aufgezeigt. Es existiert eine Reihe bekannter und bewährter Möglichkeiten zur Visualisierung sowie zur quantitativen und qualitativen Bewertung. Besonderheiten ergeben sich einerseits aus dem integrierten Ansatz und andererseits aus der Anwendung auf dem Planeten Mars. Daher wird die Beurteilung der abgeleiteten Oberflächenmodelle sowohl individuell (anhand ihrer stochastischen Informationen aus der Ausgleichung) als auch gemeinsam und schließlich mittels unabhängiger Vergleiche diskutiert.

5.1 Vorfilterung der HRSC-Bilddaten

Verschiedene Störfaktoren können die Qualität der HRSC-Daten negativ beeinflussen: Bildrauschen (*image noise*), Kompression (*compression*) und Unschärfen durch Atmosphärenstreuung (*blurring*). In Anbetracht des geringen Grauwertumfangs spielt auch die Quantisierung des Signals während der Analog-Digital-Wandlung eine Rolle.

Es gibt verschiedene Ansätze, die Qualität der Bilddaten und damit auch die der daraus abgeleiteten Modelle zu steigern. In diesem Zusammenhang haben GWINNER et al. (2005, 2007) die Auswirkung einer Glättung mittels eines ortsinvarianten und eines adaptiven Gauß-Filters auf die Ergebnisse der Bildzuordnung aus HRSC-Daten untersucht und eine Qualitätssteigerung festgestellt, wobei die Unterschiede zwischen den Ansätzen nicht signifikant sind (GWINNER et al. 2005). Allgemein wird eine Filterung von HRSC-Daten vor der Bildzuordnung als günstig bewertet (vgl. *HRSC DTM Test*: HEIPKE et al. 2006). Auch andere Filterungsansätze – beispielsweise die Reduktion von Kompressionsartefakten (SCHMIDT & NEUKUM 2007, in Bezug auf planetare Bilddaten) und/oder die Steigerung lokaler Bildkontraste nach SCHMIDT et al. (2006) bzw. SCHMIDT (2008): Anisotrope Diffusion (*anisotropic diffusion*) und PATERAKI & BALSAVIAS (2002): Wiener Filter – führen zu verbesserten Ergebnissen bei der anschließenden photogrammetrischen Punktzuordnung. Die Anwendung unterschiedlicher Filter auf HRSC-Bilddaten von SCHMIDT (2008) zeigt jedoch, dass anisotrope Filter gegenüber der isotropen Gauß-Filterung zu keinen signifikanten Genauigkeitsvorteilen in der geometrischen Modellierung führen.

Grundsätzlich ist allen Filtern gemein, dass sie die Bilddaten radiometrisch verändern, was im Hinblick auf die Ableitung radiometrischer Objektmodelle sowie die DGM-Bestimmung mittels Photoklinometrie kritisch zu betrachten ist. Anisotrope Filter und insbesondere lokale Kontrastanpassungen kommen daher im Rahmen dieser Arbeit nicht in Frage. So verwenden DORRER et al. (2005) sowie KIRK et al. (2006) für die Auswertung von HRSC-Daten mittels Shape-from-Shading gänzlich ungefilterte Eingangsdaten. Anderer-

seits kann es zielführend sein, Störungen mit einem Mittelwertfilter oder invariantem Gauß-Filter zu reduzieren.²⁸

Verschiedene Ansätze zur radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche (PINET et al. 2005, JEHL et al. 2006, 2008) und der Atmosphäre (HOEKZEMA et al. 2009) basieren auf der Reduktion der geometrischen Auflösung zu Gunsten einer Erhöhung der radiometrischen Auflösung durch die entsprechende Mittelbildung zusammengefasster Pixel. Dies kann zwar vor dem Hintergrund der Berechnung hochauflösender Objektmodelle hier nicht das Ziel sein, unterstreicht aber, dass eine vom Ansatz her vergleichbare Mittelwert- bzw. Gauß-Filterung die Ableitung radiometrischer Eigenschaften begünstigt.

Aus diesen Untersuchungen und Überlegungen lässt sich schließen, dass die Anwendung eines Gauß-Filters auf die HRSC-Bilddaten die Qualität der abgeleiteten Objektmodelle steigern kann.

5.2 Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie

Die Reflexionsgeometrie in den einzelnen Surfeln der Pseudo-Orthobilder hängt von den lokalen Oberflächenneigungen, dem Sonnenstand (Bestrahlungsrichtung) sowie der Beobachtungsrichtung ab. Das DGM und damit auch lokale Normalenvektoren sind Bestandteil der Modellierung mit dem im Kapitel 4 beschriebenen Ansatz; sie werden iterativ mit dem Facetten-Stereosehen verfeinert.

Um beurteilen zu können, in welchem Umfang räumliche und zeitliche Änderungen dieser Winkel für die Bestimmung der Reflexionseigenschaften zu berücksichtigen sind, werden diese für ein Bearbeitungsfenster abgeschätzt, sowohl innerhalb eines Pseudo-Orthobildes, d.h. eines Ausschnitts aus einem HRSC-Kanal, als auch zwischen den HRSC-Aufnahmen eines Bildstreifens. Dabei wird die typische Größe eines Fensters mit 200×200 Surfeln angenommen. Unter Berücksichtigung der üblichen Makropixelformate von 1×1 im Nadir, 2×2 für die Stereokanäle und 4×4 für die dazwischen liegenden Photometriekanäle (vgl. Abschnitt 2.2) ist es zielführend, die Surfelgröße als mittleren Wert an die projizierte Pixelgröße der Stereokanäle anzupassen, womit für die Erfassung des Bearbeitungsfensters 400 physikalische Pixel einer Scannerzeile notwendig wären.

Um die Aufnahmedauer nach oben hin abzuschätzen, müssen eine große Flughöhe (einhergehend mit geringer Bahngeschwindigkeit) der Sonde *Mars Express* und damit niedriger Bodenauflösung angesetzt werden. In Anbetracht der bisher aufgenommenen HRSC-Daten erscheinen hier 100 m im Makropixelformat 1×1 realistisch. Daraus resultiert eine maximale Gebietsgröße von 40 km \times 40 km. Eine Einzelaufnahme dauert je nach Kanal und Flughöhe in dem sehr elliptischen Orbit dann bis ca. 100 s²⁹. Während des gesamten Überfluges, d.h. der Aufnahme aller Kanäle, können mehrere Minuten verstreichen.

5.2.1 Bestrahlungswinkel

Der Sonnenstand ist für jeden Aufnahmezeitpunkt bekannt. Während die Bestrahlungsrichtungen in Bezug auf die gekrümmte Mars-Oberfläche variieren, können sie bei der Objektmodellierung im euklidischen Raum (Tangentialebene) und der Betrachtung der Sonne als im Unendlichen befindliche Punkt-

²⁸ Es sei angemerkt, dass sich eine Filterung abhängig von der Qualität der Regularisierung, welche unzureichende Bildtexturen „überbrücken“ muss, insbesondere auf die Ergebnisse des Facetten-Stereosehens durchaus negativ auswirken kann; vgl. Untersuchungen von GEHRKE & BISCHOFF (2007) sowie BISCHOFF (2007).

²⁹ Für den Bildstreifen 648, Krater Gusev, reichen die Flughöhen etwa von 2 500 km (Stereo 1) bis über 4 000 km (Photometrie 2 – der Kanal Stereo 2 wurde hier nicht aufgezeichnet). Eine Aufnahmedauer von 100 s korrespondiert mit letzterem Wert.

lichtquelle als räumlich konstant angenommen werden. Sie ändern sich allerdings mit der Zeit während des Scanvorganges.

Aus der Länge eines Mars-Tages von 88 643 s (Abschnitt 2.1) ergibt sich eine Winkelgeschwindigkeit der Sonne von $0,00406^\circ/\text{s}$ innerhalb der Ekliptik. Dies entspricht auch der Änderung der Bestrahlungswinkel in genau den Facetten, die während der Bildaufnahme senkrecht bestrahlt werden. Allgemein wirkt sich die Änderung des Sonnenstandes jedoch nur anteilig (je nach individueller Facettenneigung) auf die Bestrahlungswinkel aus. Die angegebene Winkelgeschwindigkeit ist die obere Grenze dieser Änderungen. Mit den obigen Zeit- und Bildgrößenangaben ändert sich der Bestrahlungswinkel demnach um maximal $0,4^\circ$ innerhalb eines Pseudo-Orthobildes, aber durchaus um einige Grad während der Aufnahme sämtlicher HRSC-Kanäle.

5.2.2 Beobachtungswinkel

Aus der Position der Scannerzeilen innerhalb der Bildebene der HRSC ergeben sich die charakteristischen Stereowinkel (siehe Abschnitt 2.2.2), woraus die für die stereophotogrammetrische Auswertung benötigten Parallaxenanteile in Flugrichtung resultieren. Der Winkel, unter dem ein bestimmtes Pixel beobachtet wird, hängt allerdings sowohl vom Stereowinkel der betreffenden Zeile als auch von der Zentralprojektion innerhalb dieser Zeile ab. Der Winkel lässt sich aus der inneren Orientierung – Kamera-konstante und Bildkoordinaten des Pixels – berechnen. So werden die Randpixel der beiden äußeren Zeilen (Stereowinkel von $18,9^\circ$) mit $19,7^\circ$ gegenüber der optischen Achse aufgenommen (vgl. Abbildung 5.1, links).

Wird die Kamera im Nadirmodus betrieben, so wachsen diese Beobachtungswinkel mit zunehmender Flughöhe an, da ein und derselbe Punkt von verschiedenen Positionen innerhalb des gekrümmten Orbits aufgenommen wird. Beispielsweise liegen die effektiven Stereowinkel für einen im Perizentrum aus 250 km Höhe in der Zeilenmitte aufgenommenen Punkt bei $20,4^\circ$. Für 2 500 km Flughöhe (bei 100 m Auflösung) ergeben sich theoretisch $34,3^\circ$ (Abbildung 5.1, rechts) und damit Aufnahmewinkel, die auch im Nadirmodus der HRSC deutlich über den nominellen Stereowinkeln von $18,9^\circ$ liegen.³⁰ Für spezielle Beobachtungen (*off nadir pointing*) gelten andere Geometriekonstellationen.

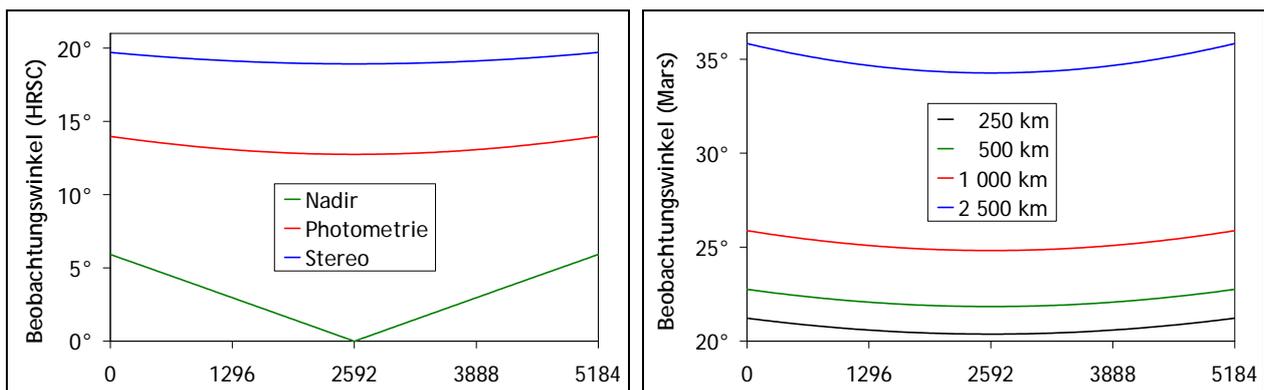


Abbildung 5.1, links: Aus der Kamerageometrie der HRSC resultierende Beobachtungswinkel für jedes Bildpixel der panchromatischen Kanäle. Rechts: Zusammenhang zwischen Aufnahmeentfernung und effektiven Beobachtungswinkeln der Stereokanäle.

³⁰ Die angegebenen Zahlenwerte sollen lediglich einer Abschätzung von Beobachtungswinkeln dienen und beruhen auf Approximationen des betreffenden Abschnittes des (nahezu) elliptischen *Mars-Express*-Orbits als Kreisbahn. Für die praktische Anwendung werden ohnehin die auf den jeweiligen Objektpunkt und HRSC-Kanal bezogenen, individuellen Winkel bestimmt.

Die auf die Tangentialebene bezogenen Beobachtungswinkel variieren innerhalb einer Zeile sowie aufgrund der Bahnkrümmung auch in Flugrichtung. Der erstere Anteil ergibt sich aus der Kamerageometrie und beträgt im Maximum, d.h. im Nadirkanal, etwa $0,9^\circ$ auf 400 Pixel (Abbildung 5.1, links). Die Bahnkrümmung ändert sich um bis zu $0,7^\circ$ im 40 km großen Bearbeitungsfenster. Damit ergibt sich eine Beobachtungswinkeländerung von $< 1,1^\circ$ über die Diagonale.

Je nach Reliefenergie des untersuchten Geländes unterliegen die lokalen, auf individuelle Facetten bezogenen Beobachtungswinkel deutlichen Schwankungen, welche mehrere 10° betragen können. Sehr starke Neigungen, die zu sichttoten Räumen insbesondere für die äußeren Stereokanäle der HRSC führen können, liegen jedoch praktisch nicht vor (vgl. Abschnitt 2.1.1). Damit ist die topologische Äquivalenz der HRSC-Bilddaten gegeben.

5.2.3 Phasenwinkel

Die Beobachtungswinkel der Stereokanäle der HRSC sind $\theta_r \approx 20^\circ$ im Perizentrum bzw. $\theta_r \approx 35^\circ$ bei etwa 2 500 km Flughöhe (Abbildung 5.1, rechts). Für Bestrahlungswinkel gilt: $\theta_r < 90^\circ$, woraus Phasenwinkel von $\alpha < 110^\circ$ bzw. $\alpha < 125^\circ$ resultieren. Für beliebige Oberflächen, d.h. geneigte Facetten, liegen lokal durchaus größere Beobachtungswinkel einhergehend mit entsprechend kleineren Bestrahlungswinkeln vor; die betreffenden Phasenwinkel bleiben konstant. Mit der HRSC können also im Perizentrum Phasenwinkel zwischen 0° und 110° abgedeckt werden, bei großer Flughöhe auch bis etwa 125° , wobei allerdings die aufgrund der flachen Bestrahlung zahlreich auftretenden Schatten die Nutzbarkeit derartiger Bilddaten einschränken.

Die Phasenwinkeländerung im Bearbeitungsfenster hängt sowohl von der Änderung der Beobachtungswinkel als auch der Änderung der Bestrahlungswinkel ab und beträgt nach den obigen Abschätzungen maximal $1,5^\circ$. Es sei aber noch einmal darauf hingewiesen, dass dieser Wert für Bilddaten mit einer geringen Nadirauflösung von 100 m gilt. Für hochauflösende HRSC-Daten schwanken die Phasenwinkel innerhalb des dementsprechend kleineren Bearbeitungsfensters nur um etwa $0,1^\circ$.

Zwischen den einzelnen HRSC-Kanälen ändern sich die Phasenwinkel je nach Sonnenstand maximal um die Unterschiede in den Beobachtungswinkeln. Die Auswirkung variierender Bestrahlungswinkel ist im Vergleich dazu gering (insbesondere wenn die Phasenwinkeländerung der Beobachtungswinkeländerung entspricht). Der in einem Orbit abgedeckte Phasenwinkelbereich kann also bei bestmöglicher Bodenauflösung bis zu 40° bzw. bei großer Aufnahmeentfernung bis etwa 70° betragen.

5.3 Reflexionsparameter: Bestimmbarkeit und Zusammenhänge

Das Reflexionsmodell von Hapke (Abschnitt 3.6.5) kann nur bei geeigneter Reflexionsgeometrie, d.h. einem großen Phasenwinkelbereich, vollständig bestimmt werden. Die Parameter sind mehr oder weniger stark korreliert; einige lassen sich überhaupt nur aus bestimmten Phasenwinkelbereichen ableiten. Liegen die entsprechenden Messungen nicht vor, müssen einzelne Parameter weggelassen bzw. konstant gehalten und damit der Freiheitsgrad des Modells reduziert werden. Zur Bestimmbarkeit sowie zu den Zusammenhängen der Hapke-Parameter existiert eine Reihe theoretischer und praktischer Untersuchungen – siehe z.B. HAPKE & WELLS (1981), MCGUIRE & HAPKE (1995), HARTMAN & DOMINGUE (1998), HAPKE et al. (1998), CORD (2003), CORD et al. (2003, 2005), HELFENSTEIN & SHEPARD (2003), BARATOUX et al. (2006), SHEPARD & HELFENSTEIN (2007), HAPKE (2008) und, im Überblick für den Planeten Mars, JOHNSON et al. (2008). Aufbauend auf diese Daten und Ergebnisse und die obigen Überlegungen zur Beobachtungsgeometrie der HRSC auf *Mars Express* wird im Folgenden abgeschätzt, welche Parametrisierung für die radiometrische Modellierung aus HRSC-Daten zweckmäßig ist.

Grundsätzlich ist dabei eine möglichst weitmaschige Facettierung der materialspezifischen Parameter, d.h. das Zusammenfassen von Bereichen gleicher Materialeigenschaften, anzustreben. So werden die Redundanz gesteigert und weiterhin – höherfrequente Variationen der Oberflächentopographie vorausgesetzt – eine große Bandbreite lokaler Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel in die Modellierung einbezogen, was sowohl die bestimmbare Parameterzahl als auch das Signifikanzniveau erhöhen kann.

Aufgrund des vergleichsweise geringen Phasenwinkelbereiches kann das vollständige Hapke-Modell nicht aus den Daten eines HRSC-Bildstreifens bestimmt werden (PINET et al. 2006, JEHL et al. 2008).

5.3.1 Albedo bzw. Teilchenalbedo

Die Albedo ist eine grundlegende Materialeigenschaft und daher in jedem Reflexionsmodell parametrisiert. In einfachen Modellen wie Lambert oder Lommel-Seeliger stellt sie den einzigen Freiheitsgrad dar und ist mit hoher Signifikanz bestimmbar. Letzteres gilt auch für die Teilchenalbedo im Hapke-Modell (BARATOUX et al. 2006, HAPKE 2008), wobei mit zunehmender Komplexität der Parametrisierung auch die Korrelationen zunehmen; insbesondere ist die Teilchenalbedo mit der Porosität (Abschnitt 5.3.4) sowie mit der Oberflächenrauigkeit (Abschnitt 5.3.5) korreliert.

5.3.2 Parametrisierung der Phasenfunktion

Für die Beschreibung der Reflexionsverteilung an einem Einzelteilchen sind die Art der Phasenfunktion und die Anzahl ihrer Parameter ausschlaggebend. Wenn wie bei einem HRSC-Bildstreifen der Phasenwinkelbereich nur in Ausschnitten abgedeckt ist, besteht die Gefahr einer Überparametrisierung. Grundsätzlich sollte mit wenigen signifikanten Parametern das Wesen der richtungsabhängigen Verteilung möglichst realistisch beschrieben werden, obwohl sowohl die Henyey-Greenstein-Funktion als auch Legendresche Polynome nicht die physikalischen Vorgänge modellieren (vgl. Abschnitt 3.5.3).

Mit diesem Ziel haben MCGUIRE & HAPKE (1995) ein Laborexperiment durchgeführt, bei dem das Reflexionsverhalten unterschiedlicher Polyesterharz-, Glas- und Metallpartikel von etwa 1 cm Größe im Phasenwinkelbereich von 1° bis 170° gemessen wurde. Ein Aspekt der Auswertung war die Anpassung der beiden genannten Phasenfunktionen mit jeweils zwei Parametern. Diese Studie wurde von HARTMAN & DOMINGUE (1998) um die Bestimmung der Henyey-Greenstein-Funktion mit drei Parametern erweitert. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Daten sowohl vollständig als auch für drei Teilbereiche des Phasenwinkels ausgewertet, um Beobachtungskonfigurationen der HRSC zu simulieren, und zwar:

- Bereich der im Nadirmodus üblichen Phasenwinkel: $1^\circ - 100^\circ$
- Orbit bei hohem Sonnenstand (ca. 30°): $1^\circ - 60^\circ$
- Orbit bei niedrigem Sonnenstand (ca. 75°): $50^\circ - 100^\circ$

Dafür werden Messreihen zu acht Partikeln ausgewählt (Tabelle 5.1) und die beiden Phasenfunktionen mit einem, zwei und für Henyey-Greenstein auch drei Parametern an die Beobachtungen angepasst. Die Daten wurden bereits um den Einfluss der Teilchenalbedo korrigiert und liegen in normierter Form vor, sodass die Bestimmung der Parameter direkt mit vermittelnden Ausgleichungen erfolgen kann.

In Abbildung 5.2 sind die Anpassungen der Henyey-Greenstein-Funktionen mit zwei Parametern (HG2) und mit drei Parametern (HG3) sowie der Legendreschen Polynome zweiten Grades für vier der acht Partikel dargestellt, wobei jeweils die Berechnung aus allen Messwerten der aus einem für HRSC typischen Bereich von 50° bis 100° gegenübergestellt wird. Die Darstellung der Funktionen über den gesamten Phasenwinkelbereich zeigt das Extrapolationsverhalten und damit die Qualität der Modellierung. Eine gute Phasenfunktion sollte, sofern sie in einem beliebigen Teil des Phasenwinkelbereiches signifikant bestimmbar ist, das Wesen der richtungsabhängigen Reflexion an einem Einzelteilchen für alle Phasenwinkel beschreiben können.

Tabelle 5.1: Beschaffenheit der untersuchten Polyesterharzpartikel (MCGUIRE & HAPKE 1995).

Partikel (Form)	Oberfläche	Inneres
Kugel	glatt	transparent
Kugel	rau	transparent
Kugel	gekörnt	transparent
Klumpen (unrund)	glatt mit Rissen	transparent
Kugel	glatt	geringe Streuteilchendichte
Kugel	glatt	mittlere Streuteilchendichte
Kugel	glatt	hohe Streuteilchendichte
Agglutinat	(glatt)	(porös)

Aus den Modellierungen auf Basis aller Messungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Für alle acht Partikel können die Legendreschen Polynome mit ein und zwei Parametern und die Henyey-Greenstein-Funktionen mit ein, zwei und drei Parametern abgeleitet werden.
- Die HG3-Funktion, welche die Modellierung unterschiedlich breiter Vorwärts- und Rückwärtsstreuung ermöglicht, ist nicht für alle Partikel signifikant. Das geringste Signifikanzniveau (d.h. $HG3 \approx HG2$) besteht bei hoher interner Streuteilchendichte, wobei hier auch die HG2-Funktion nicht signifikant ist und damit ein Parameter ausreicht, um die für diesen Partikel dominierende Rückstreuung zu beschreiben. Das Phasenwinkelverhalten des Agglutinats hingegen wird nur durch HG3 sehr gut modelliert.
- Sowohl die Ausgleichungsstatistik als auch die in Abbildung 5.2, links, dargestellten Ergebnisse zeigen, dass das Reflexionsverhalten der meisten Partikel durch die Henyey-Greenstein-Funktionen (RMSE³¹ aus den Residuen über alle acht Partikel: 0,25 für HG2 bzw. 0,20 für HG3) teils deutlich besser beschreibbar ist als durch Legendresche Polynome (RMSE: 0,46).

Für die Berechnungen anhand der Phasenwinkelbereiche 1-100°, 1-60° und 50-100° kann zusammenfassend festgestellt werden:

- Auch aus kleinen Phasenwinkelbereichen können Funktionen mit zwei freien Parametern bestimmt werden. Obwohl beispielsweise die Messungen zwischen 50° und 100° nicht die charakteristischen Vorwärts- und Rückwärtsstreuungen umfassen, wird dieses Verhalten prinzipiell für die meisten der untersuchten Partikel beschrieben – vgl. Extrapolationen in Abbildung 5.2, rechts. Das unterstreicht die Eignung der rein empirischen Funktionen zur Modellierung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion.
- Die Parameter der HG3-Funktion sind allerdings kaum signifikant bestimmbar; in einigen Fällen konvergiert die Ausgleichung gar nicht. Praktisch bedeutet dies, dass aus einem kleinen Phasenwinkelbereich die Unterschiede in Vorwärts- und Rückwärtsstreuung nicht zuverlässig abgeleitet werden können. Das Extrapolationsverhalten der HG2-Funktion ist hier besser (vgl. z.B. transparente Kugel).

³¹ root mean square error

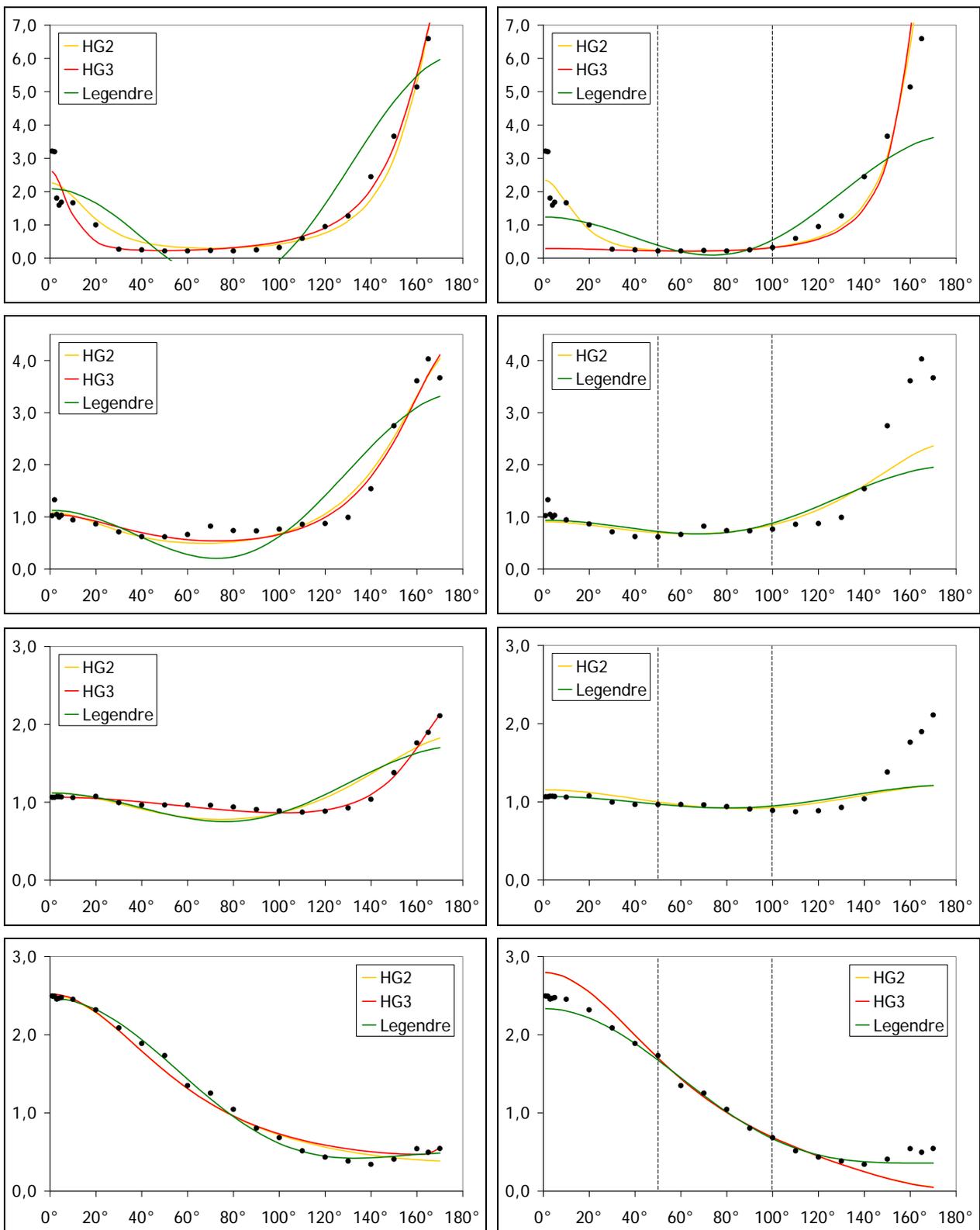


Abbildung 5.2: Ausgewählte Beispiele zur Anpassung verschiedener Phasenfunktionen an die Daten von MCGUIRE & HAPKE (1995), linke Diagramme: Berechnung mit dem gesamten Datensatz, rechte Diagramme: Berechnung aus Daten des Phasenwinkelbereiches 50-100° und Darstellung des Extrapolationsverhaltens. Untersuchte Materialien, von oben nach unten: transparente Kugel mit glatter Oberfläche; transparente, unrunder Partikel (Klumpen) mit glatter Oberfläche; Agglutinat; Kugel mit glatter Oberfläche und hoher interner Streuteilchendichte. Phasenfunktionen: Henyey-Greenstein mit zwei bzw. drei Parametern (HG2 und HG3) sowie Legendre-Polynom zweiten Grades. (Die Funktionswerte sind einheitenlos und folgen aus der Normierung der Phasenfunktionen über den Halbraum.)

- Die aus den Messungen $1-60^\circ$ sowie $50-100^\circ$ bestimmten HG2-Parameter zeigen kaum signifikante Unterschiede; das Extrapolationsverhalten der ersten (RMSE zwischen 5° und 165° über alle Partikel: 0,55) ist statistisch schlechter als das der zweiten (RMSE: 0,40). Dies hängt allerdings vom jeweiligen Partikel ab: Für eine dominierende Rückstreuung stellt die Berechnung aus kleineren Phasenwinkeln erwartungsgemäß die bessere Anpassung dar (RMSE: 0,14 gegenüber 0,22).
- Analog zu der obigen Feststellung gilt wiederum, dass das Reflexionsverhalten der meisten Partikel durch die HG2-Funktion (RMSE zwischen 5° und 165° für die aus dem Phasenwinkelbereich $50^\circ - 100^\circ$ abgeleitete Funktion über alle Partikel: 0,40) besser modelliert wird als durch Legendresche Polynome (RMSE: 0,56).

Grundsätzlich kann das Fazit von MCGUIRE & HAPKE (1995) sowie HARTMAN & DOMINGUE (1998) bestätigt werden, dass die Double-Henyey-Greenstein-Funktion einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit der Beschreibung des phasenwinkelabhängigen Reflexionsverhaltens eines Einzelteilchens und Parameterzahl darstellt. Sie ist daher die meist verwendete Phasenfunktion (vgl. Überblick in JOHNSON et al. 2008 und dortige Quellen) und wird auch hier für die integrierte Oberflächenmodellierung angesetzt.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit für kleine, der Aufnahmeconfiguration der HRSC entsprechende Phasenwinkelbereiche zeigen, dass die Bestimmung der beiden Parameter b und c ³² aus den Bilddaten eines *Mars-Express*-Orbits möglich sein sollte, wobei deren Genauigkeit und damit das Signifikanzniveau tendenziell mit der Zunahme der internen Streudichte der Oberflächenpartikel ($c \rightarrow 1$) abnehmen. Die Modellierung des Reflexionsverhaltens über alle Phasenwinkel hängt dabei insofern von der Lage des erfassten Teilbereiches ab, als dass eine dominierende Rückstreuung aus Messdaten in kleinen Phasenwinkeln genauer modelliert werden kann als aus mittleren.

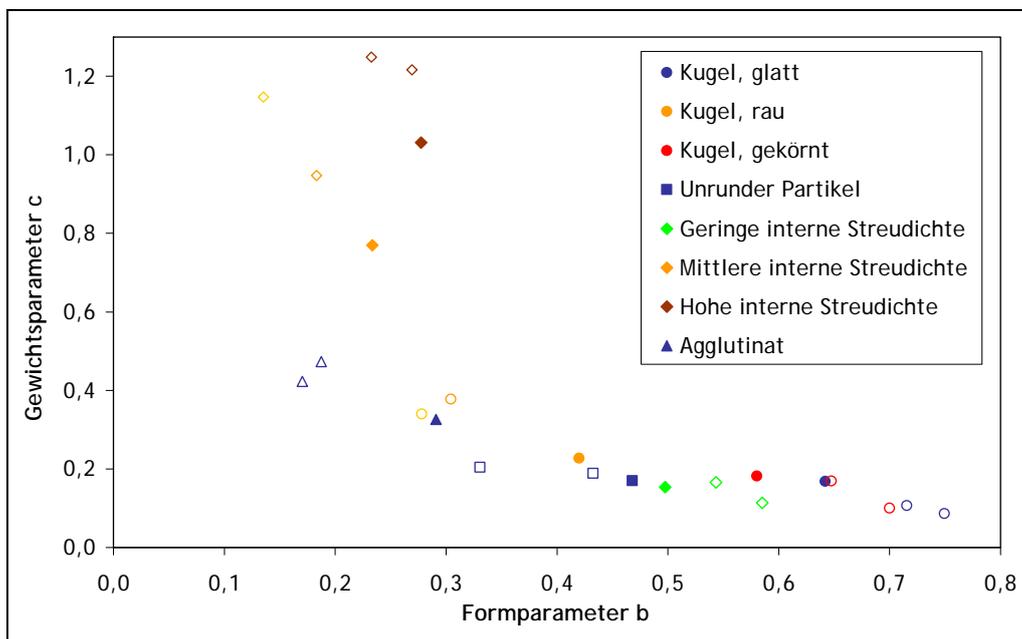


Abbildung 5.3: Parameter b und c der Double-Henyey-Greenstein-Funktion, Modellierungen anhand aller Daten (volle Signaturen) sowie für Teile des Phasenwinkelbereiches ($1-60^\circ$ und $50-100^\circ$), die durch HRSC-Beobachtungen abgedeckt werden können (offene Signaturen, in Form und Farbe identisch).

³² Die Einführung des Gewichtsparameters c ist dabei nur sinnvoll, wenn die untersuchten Oberflächenpartikel sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsstreuung aufweisen. Anderenfalls kann die Form der gestreuten Strahlungskeule durch b allein beschrieben werden (vgl. Abschnitt 3.5.3.2).

Abbildung 5.3 zeigt ein b-c-Diagramm der Henyey-Greenstein-Parameter nach HAPKE (1993). Daraus wird deutlich, dass die aus Teilbereichen des Phasenwinkels bestimmten Werte nicht nur einer größeren Streuung unterliegen als die aus allen Messungen ermittelten, sondern dass die Abweichungen systematisch sind: Die Form der Strahlungskeule wird verstärkt, d.h. für $b > 0,5$ wird sie noch schmalere (siehe auch Abbildung 5.2 oben) und für $b < 0,5$ noch breitere. Ähnliches gilt für den Gewichtsparameter c ; insbesondere Werte $c \rightarrow 1$ verschieben sich zu $c > 1$. Für die Analyse der aus HRSC-Daten abgeleiteten Parameter ist daher zu beachten, dass sich der typische, L-förmige Wertebereich gegenüber seiner in Abbildung 3.4 dargestellten Form vergrößern kann.

5.3.3 Oppositionseffekt: SHOE und CBOE

Zur Bestimmung des Oppositionseffektes, der sich aus Shadow-hiding (SHOE, zwei Parameter) und kohärenter Rückstreuung (CBOE, zwei Parameter) zusammensetzt, sind Beobachtungen unter kleinen Phasenwinkeln notwendig. Die Halbweite und damit die Modellierbarkeit der vier Parameter hängen von der Korngrößenverteilung des Materials ab; siehe dazu Abschnitt 3.5.4. In Abbildung 5.4 sind die phasenwinkelabhängigen Auswirkungen der beiden Anteile des Oppositionseffektes auf das Hapke-Reflexionsmodell (Faktoren B_{SH} bzw. B_{CB}) dargestellt. Für den SHOE werden für den Mars typische Parameter h_{SH} nach JOHNSON et al. (2008) angenommen. CBOE-Daten für den Mars liegen bislang nicht vor, und das entsprechende Diagramm basiert auf Werten analog zum SHOE, obwohl die Parameter nicht direkt vergleichbar sind.³³ Als Amplituden werden $B_{SH0} = 1$ und $B_{CB0} = 1$ angesetzt. Kleinere Werte würden die resultierenden Faktoren proportional verringern – vgl. Formeln (3.35) und (3.39).

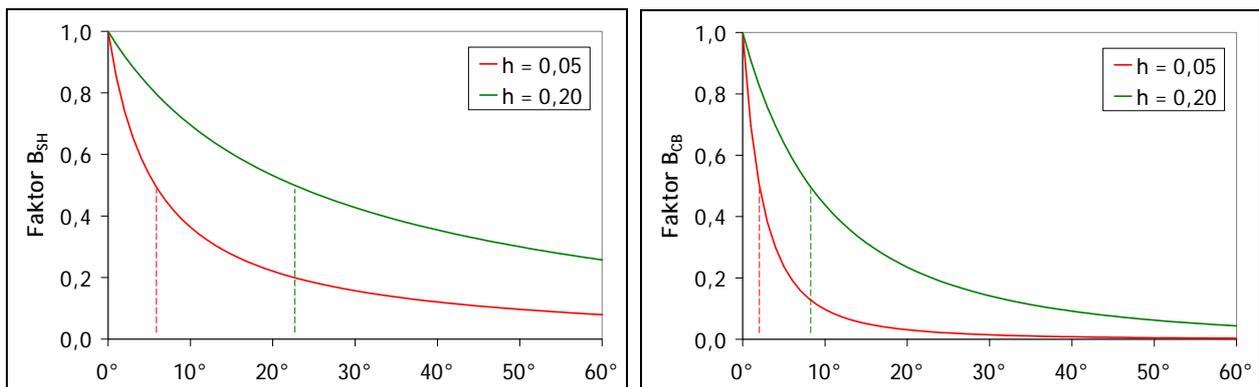


Abbildung 5.4: SHOE (Faktor B_{SH} , links) und CBOE (Faktor B_{CB} , rechts) als Funktion des Phasenwinkels und Kompressionsparameters h_{SH} bzw. h_{CB} . Die gestrichelten Linien geben die jeweiligen Halbweiten (HWHM) an.

Sowohl die Grafik als auch die Tatsache, dass bisher noch keine CBOE-Parameter für den Mars bestimmt worden sind, unterstreichen, dass dies auch aus HRSC-Daten kaum möglich sein wird. Wo Phasenwinkel um 0° auftreten, sind sie aufgrund der Schwankungen in Sonnenstand und Beobachtungswinkeln lokal begrenzt und liegen in einem zweiten Kanal desselben Orbits, sofern überhaupt vorhanden, an anderer Stelle. Hinzu kommt, dass der phasenwinkelabhängige Verlauf von CBOE und SHOE ähnlich und damit deren Einflüsse schwer trennbar sind. HAPKE (2002) empfiehlt, den Oppositionseffekt dann ausschließlich als SHOE zu modellieren. Dieser zeigt zwar, abhängig vom Material, größere Halbweiten; dennoch ist es unwahrscheinlich, dass aus HRSC-Daten eines Orbits – mit Beobachtungswinkeldifferenzen von mehr als $6,0^\circ$ bzw. $12,9^\circ$ (dies sind die Stereowinkeldifferenzen, vgl. Tabelle 2.3) – beide Parameter abgeleitet wer-

³³ Das von HAPKE et al. (1998) untersuchte Mondgestein zeigt (in etwa) einen CBOE wie in Abbildung 5.4, rechts, für $h_{CB} = 0,05$ dargestellt.

den können. Praktische Modellierungen aus unterschiedlichen Experimenten beschränken sich oft auf den Kompaktionsparameter h_{SH} (JOHNSON et al. 2006, 2008). Dies wäre auch für HRSC-Bilddaten bei entsprechend kleinen Phasenwinkeln denkbar.

5.3.4 Porositätskorrektur

Im Rahmen der theoretischen Ableitung der Porositätskorrektur verdeutlicht HAPKE (2008) zugleich auch die potenziellen Schwierigkeiten für deren praktische Bestimmung. Sie ist stark mit der Teilchenalbedo korreliert (vgl. entsprechende Diagramme in HAPKE 2008) und daher ohne Vorwissen über die Größenordnung der Porosität nur schwer von ersterer zu trennen – direkte Messungen der Porosität planetaren Regoliths liegen allerdings bislang nicht vor.

In Anbetracht dessen sowie des limitierten Phasenwinkelbereiches der HRSC-Messungen wird die Porositätskorrektur für die Oberflächenmodellierung in dieser Arbeit nicht angesetzt. Es ist zu erwarten, dass die Teilchenalbedo dann systematisch zu groß ausfällt.³⁴

5.3.5 Oberflächenrauigkeit

Die makroskopische Oberflächenrauigkeit verursacht Abschattungen im Subpixelbereich, insbesondere bei flachen Bestrahlungs- und/oder Beobachtungswinkeln. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine entsprechende geometrische Konstellation vorliegen muss, um die Rauigkeit ableiten zu können. In Anbetracht der für den Mars typischen Werte von $\bar{\theta} < 30^\circ$ (JOHNSON et al. 2008) erscheinen die mit der HRSC möglichen Beobachtungswinkel von meist deutlich unter 35° als zu klein für die zuverlässige Bestimmung. Die makroskopische Rauigkeit kann also nur aus HRSC-Daten berechnet werden, die unter flachen Bestrahlungswinkeln, d.h. niedrigem Sonnenstand, aufgenommen worden sind.

Der Rauigkeitsparameter ist mehr oder weniger stark mit der Teilchenalbedo korreliert, insbesondere wenn wie bei der HRSC nur wenige, für diesen Zweck kleine Beobachtungswinkel vorliegen und sich der Sonnenstand zwischen den einzelnen Aufnahmen eines Orbits nur geringfügig ändert und damit ähnliche Schattierungen erzeugt. In diesem Fall ist nicht nur die Albedo sondern auch der Effekt der Rauigkeit (nahezu) isotrop. So sind die beiden Einflüsse schwer trennbar, da, vereinfacht gesagt, in der Modellierung eine Zu- oder Abnahme der Albedo durch eine entsprechende Zu- oder Abnahme des Rauigkeitsparameters „kompensiert“ werden kann.³⁵ In der Praxis muss, wenn die Ausgleichsberechnung nicht konvergiert, ein um die makroskopische Oberflächenrauigkeit reduziertes Modell angesetzt werden. Eine auf der Annahme $\bar{\theta} = 0^\circ$ basierende Teilchenalbedo ist dabei tendenziell zu niedrig.

Der Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Teilchenalbedo wird, abhängig vom Phasenwinkelbereich, auch durch die Wahl der Phasenfunktion beeinflusst. HARTMAN & DOMINGUE (1998) zeigen dies am Beispiel der Double-Henyey-Greenstein-Funktion mit zwei bzw. drei Parametern (siehe auch obigen Ab-

³⁴ Dazu sei angemerkt, dass die Porositätskorrektur erst aktuell vorgeschlagen wurde. Daher basieren nahezu alle bisherigen Veröffentlichungen auf dem Hapke-Modell ohne diesen Parameter, sodass die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werte direkt vergleichbar sind.

³⁵ Diese positive Korrelation zwischen Teilchenalbedo und makroskopischer Rauigkeit steht in keinem Widerspruch zu der mehrfach dokumentierten Feststellung, dass die aus dem Hapke-Modell abgeleitete Rauigkeit mit der Zunahme der Teilchenalbedo tendenziell abnimmt (z.B. CORD et al. 2003, 2005, HELFENSTEIN & SHEPARD 2003). Dies bezieht sich nicht auf die mathematische Modellierung an sich, sondern auf die Tatsache, dass die bei zunehmender Albedo verstärkt auftretenden Mehrfachstreuungen (Abschnitt 3.5.2) die der Rauigkeitsberechnung zugrunde liegenden Mikroschatten aufhellen und der abgeleitete Parameter damit systematisch zu klein wird. In diesem Zusammenhang untersuchen SHKURATOV et al. (2005) eine effektive Oberflächenrauigkeit.

schnitt 5.3.2). Eine Gegenüberstellung aller Hapke-Parameter ohne CBOE, jeweils bestimmt mit der Henyey-Greenstein-Funktion mit ein und zwei Freiheitsgraden, aus Daten des *Mars Exploration Rovers Spirit* ist in JOHNSON et al. (2006) zu finden. Insbesondere die Rauigkeit und die Teilchenalbedo weisen dabei teils signifikante Unterschiede zwischen den beiden Modellierungen auf, wobei die erwähnte positive Korrelation dieser beiden Parameter klar erkennbar ist.

Aufgrund des in einem HRSC-Bildstreifen abgedeckten Phasenwinkelbereiches ist die gemeinsame Bestimmung von Rauigkeit und Oppositionseffekt nicht möglich. Dazu müssten Messungen aus mehreren Orbits kombiniert werden (vgl. JEHL et al. 2008), was außerhalb der Ziele dieser Arbeit liegt. In Anbetracht der Überlegungen des gesamten Abschnitts 5.3 erscheint im Rahmen der geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten die Parametrisierung des Hapke-Modells nach Gleichung (3.63) als möglich.

5.4 Empirische Reflexionsgesetze als Approximationen des Hapke-Modells

Die Überlegungen und Untersuchungen des vorangegangenen Abschnitts unterstreichen die Komplexität des Hapke-Modells. Daher wird es für die Photoklinometrie kaum verwendet und das Reflexionsverhalten durch einfachere, empirische Modelle parametrisiert. Vor diesem Hintergrund hat MCEWEN (1991) untersucht, inwieweit das Lunar-Lambert-Modell und die Minnaert-Funktion für die Approximation des Hapke-Modells geeignet sind. Beide Modelle haben zwei Parameter: die Albedo A_N bzw. A_M und einen Gewichtungsfaktor L bzw. k , die in Abhängigkeit vom Phasenwinkel angesetzt werden müssen. Damit wird das Lunar-Lambert-Modell (3.59) zu:

$$R = A_N(\alpha) \left[2L(\alpha) \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} + (1 - L(\alpha)) \cos \theta_i \right] \quad (5.1)$$

Und die phasenwinkelabhängige Minnaert-Funktion als Erweiterung von Gleichung (3.60) ist:

$$R = A_M(\alpha) \cos^{k(\alpha)} \theta_i \cos^{k(\alpha)-1} \theta_r \quad (5.2)$$

MCEWEN (1991) hat das Hapke-Modell mit unterschiedlichen Parametern berechnet und die bestmögliche Anpassung der resultierenden Reflexionsfaktoren für jeden Phasenwinkel durch die Lunar-Lambert- und Minnaert-Parameter bestimmt. Die Berechnung für jeden Phasenwinkel basiert auf einer Reihe unterschiedlicher Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel, die gleichabständig auf dem photometrischen Äquator (*photometric equator*)³⁶ und Spiegelmeridian (*mirror meridian*)³⁷ verteilt sind. Die Simulation zeigt, dass grundsätzlich beide Funktionen geeignet sind, das Hapke-Modell zu approximieren. Dabei ist das Lunar-Lambert-Modell der Minnaert-Funktion aus zwei Gründen überlegen:

1. Die Differenzen der Lunar-Lambert-Approximation zu den Hapke-Sollwerten sind kleiner. Zudem weisen die Parameter geringere Schwankungen zwischen photometrischem Äquator und Spiegelmeridian auf.
2. Die Lunar-Lambert-Funktion ist – insbesondere für größere Phasenwinkel – einfacher zu handhaben, während die Minnaert-Funktion mehrdeutig sein kann. Siehe dazu auch Abschnitt 3.6.4.

³⁶ Der photometrische Äquator ist derjenige Großkreis, in dessen Ebene sich sowohl die Strahlungsquelle als auch der Sensor befinden; die Azimutalwinkeldifferenz beträgt dann 180° (siehe auch Abbildung 3.3).

³⁷ Der Spiegelmeridian ist der zum photometrischen Äquator senkrechte Großkreis, in dem Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel identisch sind. Die Azimutalwinkeldifferenz nimmt mit zunehmender Entfernung zum Äquator ab.

Daher wird für den im Abschnitt 4.8.3 beschriebenen Ausgleichungsansatz das Lunar-Lambert-Modell zur radiometrischen Beschreibung der Mars-Oberfläche verwendet. Das Hapke-Modell wird anschließend abgeleitet, wobei Startwerte für diese Ausgleichungsberechnung anhand der Lunar-Lambert-Parameter bestimmt werden können. Der Zusammenhang zwischen Lunar-Lambert und Hapke ist für ausgewählte Werte in Abbildung 5.5 dargestellt, jeweils mit kleiner und großer Teilchenalbedo und Oberflächenrauigkeit sowie mittleren Werten für Phasenfunktion und Oppositionseffekt. Die Berechnung basiert auf Bestrahlungs- und Beobachtungswinkeln von $0^\circ < \theta_{i,r} < 80^\circ$, soweit für den jeweiligen Phasenwinkel zutreffend, im Intervall von 1° .

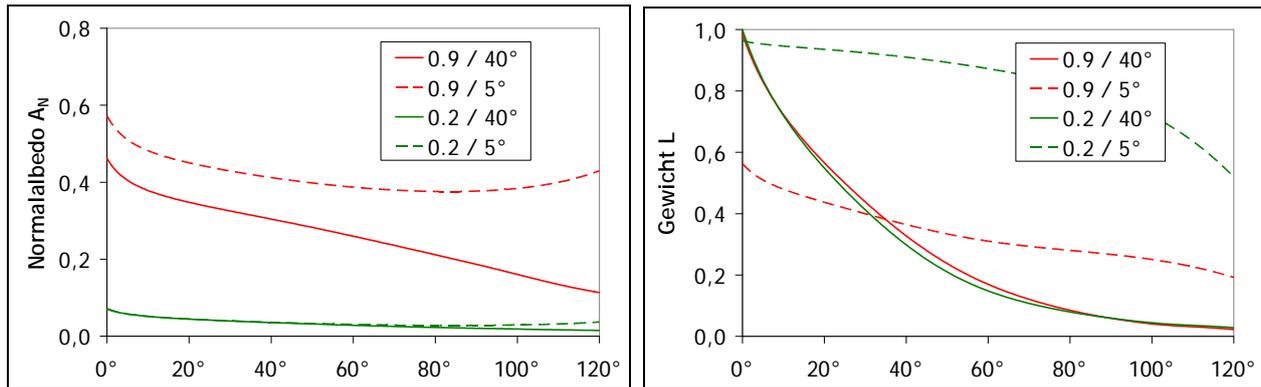


Abbildung 5.5: Approximation des Hapke-Modells durch Lunar-Lambert-Parameter als Funktion des Phasenwinkels. Links: Normalalbedo A_N , rechts: Gewichtsfaktor L . Hapke-Parameter: $B_{CB0} = 1$, $h_{CB} = 0$; $B_{SH0} = 1$, $h_{SH} = 0,065$ (siehe Abschnitt 3.5.4); $b = 0,25$, $c = 0,50$ (vgl. Abbildung 3.4); w und $\bar{\theta}$ variieren und sind für die jeweiligen Graphen angegeben.

Es wird deutlich, dass die Albedo $A_N(\alpha)$ in erster Linie von der Teilchenalbedo w und der Phasenfunktion $P(\alpha, b, c)$ abhängt. Mit zunehmender (Teilchen-)Albedo wird der Einfluss der Oberflächenrauigkeit $\bar{\theta}$ größer: Rauigkeit lässt bei zunehmendem Phasenwinkel die Oberfläche dunkler erscheinen. Der Parameter $L(\alpha)$ wird aufgrund der durch Rauigkeit verursachten Schattierungen mit dem Phasenwinkel kleiner. Bis zu Rauigkeiten im Bereich von 20 - 30° – abhängig von der Teilchenalbedo und Phasenfunktion, vgl. Diagramme in MCEWEN (1991) – nimmt $L(\alpha)$ ab, wobei auch negative Werte bis etwa $L = -0,2$ bei Phasenwinkeln um $\alpha = 110^\circ$ auftreten; danach kehrt sich der Effekt um. Der Zusammenhang zwischen $L(\alpha)$ und $\bar{\theta}$ wird bei geringer Rauigkeit durch die Teilchenalbedo beeinflusst, bei $\bar{\theta} \approx 40^\circ$ hat diese nahezu keine Auswirkungen mehr.

Entscheidend für die Eignung der Lunar-Lambert-Funktion für die Photoklinometrie, für die sie bereits erfolgreich von PIECHULLEK (2000), KIRK et al. (2004), LOHSE et al. (2006) oder GEHRKE (2008) angewendet wurde, sind jedoch weniger die Zusammenhänge zwischen den entsprechenden Parametern, sondern die Genauigkeit der Approximation. Vorausgesetzt, dass das Hapke-Modell die bestmögliche physikalische Beschreibung des Reflexionsverhaltens einer Planetenoberfläche darstellt, ist die absolute Genauigkeit durch Reflexionsfaktordifferenzen zwischen der Lunar-Lambert-Approximation und dem Hapke-Modell gegeben. Die zu den Funktionen in Abbildung 5.5 für jeden Phasenwinkel bestimmten RMSEs sind in Abbildung 5.6 gezeigt, sowohl absolut als auch im Verhältnis zum jeweiligen Reflexionsfaktor. Es wird deutlich, dass die relativen Fehler sowohl mit der Teilchenalbedo und Rauigkeit als auch mit steigendem Phasenwinkel zunehmen. Da die bisher für die Mars-Oberfläche bestimmten Hapke-Parameter unter den dargestellten Werten von $w = 0,9$ und $\bar{\theta} = 40^\circ$ liegen (JOHNSON et al. 2008), ist der Fehler der Lunar-Lambert-Approximation im Phasenwinkelbereich der HRSC-Daten geringer als 10% , für dunkle und glatte Oberflächen etwa 1 - 2% .

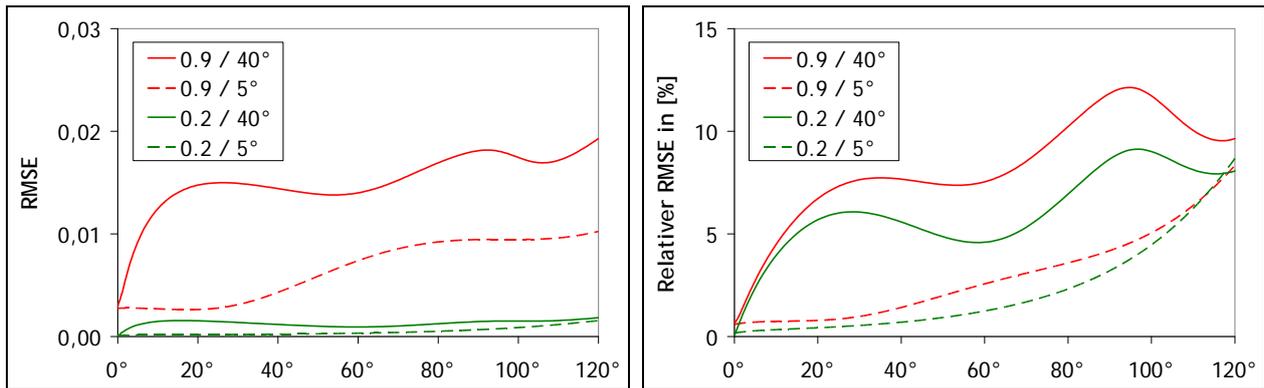


Abbildung 5.6: Externe Genauigkeit der Approximation des Hapke-Modells entsprechend Abbildung 5.5 als Funktion des Phasenwinkels. Links: RMSEs der Reflexionsfaktordifferenzen, rechts: RMSEs der Verhältnisse dieser Differenzen zu den jeweiligen Reflexionsfaktoren.

Da die Phasenwinkelvariationen innerhalb eines Bearbeitungsfensters meist deutlich unter 1° liegen (vgl. Abschnitt 5.2.3), erscheint es zweckmäßig, für jeden HRSC-Kanal und damit jedes Pseudo-Orthobild ein Lunar-Lambert-Modell anzusetzen. Lokal variierende Oberflächenneigungen vorausgesetzt, sollte dann eine ausreichende Bandbreite von Bestrahlungs- und Beobachtungswinkeln vorliegen, um die Parameter signifikant bestimmen zu können. Dabei zeigt die Albedo eine im Vergleich zum Gewichtsparemeter geringere Phasenwinkelabhängigkeit; vgl. Abbildung 5.5.

5.5 Bewertungskriterien und Vergleichsmöglichkeiten für die Ergebnisse

Für die Bewertung der berechneten Oberflächenmodelle bietet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Kriterien an. Grundsätzlich kann anhand aussagekräftiger Visualisierungen eine qualitative Beurteilung der einzelnen Modelle vorgenommen werden. Die Ausgleichungsergebnisse, d.h. die stochastischen Eigenschaften, ermöglichen quantitative Genauigkeitsaussagen und Signifikanztests – siehe Abschnitt 4.1 sowie NIEMEIER (2002). Auch sollten sich die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Modellen in ihrer Bewertung widerspiegeln und sowohl qualitative als auch quantitative Vergleiche vorgenommen werden. Schließlich liegen für einige Regionen der Mars-Oberfläche Vergleichsdaten vor, welche eine Einordnung der hier erzielten Ergebnisse zulassen.

5.5.1 Visualisierungsmöglichkeiten und Genauigkeitsmaße der Einzelmodelle

Für die einzelnen Objektmodelle liegen Funktionswerte bezüglich regelmäßiger Lageraster (Facetten) vor, vgl. Abbildung 4.2. Daher bietet es sich an, diese als grauwert- bzw. farbkodierte Bildmatrizen zu visualisieren. Individuelle mittlere Fehler für sämtliche Funktionswerte sowie ihre Korrelationen resultieren aus der Ausgleichsrechnung. Sie können, analog zu den Modellen selbst, bildhaft dargestellt werden.

5.5.1.1 Pseudo-Orthobilder und Mittelbild

Die Pseudo-Orthobilder gehen zwar als Beobachtungen in die Ausgleichungen ein, stellen aber gleichzeitig auch Ergebnisse (einschließlich ihres Mittelbildes) dar, die während des Berechnungsablaufs iterativ verbessert werden. Genauigkeitsmaße für die Reflexionsfaktoren in den Objektsurfeln liefern damit sowohl die Mittelwertberechnung (Abschnitt 4.5.4) als auch die Ausgleichung. Anhand der Varianzkomponenten sollten die Pseudo-Orthobilder der einzelnen HRSC-Kanäle verglichen und so auflösungs- oder stereowinkelabhängige Aussagen getroffen werden.

Die Qualität der Einzelbilder und damit auch die des Mittelbildes ist von der radiometrischen und geometrischen Modellierung abhängig. Das Mittelbild kann dementsprechend unscharf wirken und auch Mehr-

fachabbildungen aus Lageversätzen aufgrund von DGM-Ungenauigkeiten aufweisen. Deren Quantifizierung ermöglichen Korrelationskoeffizienten r zwischen den Pseudo-Orthobildern R_{HRSC} oder gegenüber dem Mittelbild R_{Mars} :

$$r = \frac{\sum_i \sum_j (R_{ij,Mars} - \langle R_{Mars} \rangle) (R_{ij,HRSC} - \langle R_{HRSC} \rangle)}{\sqrt{\sum_i \sum_j (R_{ij,Mars} - \langle R_{Mars} \rangle)^2} \sqrt{\sum_i \sum_j (R_{ij,HRSC} - \langle R_{HRSC} \rangle)^2}} \quad (5.3)$$

Der Vergleich der einzelnen Korrelationskoeffizienten kann Signalstörungen aufdecken. Allgemein ist ein möglichst hoher Wert anzustreben, also $r \rightarrow 1$. Abhängig vom Bildkontrast deuten Werte von $r < 0,9$ auf Fehler hin (SCHNEIDER 1991). Die Korrelationskoeffizienten können als Qualitätsmaß bzw. auch als Abbruchkriterium des iterativen Berechnungsablaufs dienen. Sie lassen allerdings keine direkte Quantifizierung der (Rest-)Fehler im DGM oder im Reflexionsmodell zu.

5.5.1.2 DGM

Neben einer bildhaften Darstellung („Grauwertgebirge“) bietet sich für die Visualisierung eines DGMs die Perspektivansicht an, in der die einzelnen Facetten zusätzlich höhenabhängig farbkodiert werden. So lässt sich ein plastischer, dreidimensionaler Eindruck vermitteln. Weit verbreitet ist auch die Reliefdarstellung (*shaded relief*), für die ein DGM – zumeist unter Anwendung des Lambertschen Kosinusetzes nach Gleichung (3.57), analog zur Hangschummerung in der Kartographie – aus einer fiktiven Richtung bestrahlt wird.³⁸ Diese Berechnung von Reflexionsfaktoren stellt prinzipiell die Umkehrung der Photoklinometrie dar. Je nach Reflexionsgesetz spielen dabei zwar auch die Beobachtungswinkel eine Rolle; deren Unterschiede sind aber für einen HRSC-Bildstreifen begrenzt (siehe Abschnitt 5.2.2). Außerdem ist der Sonnenstand für die Bilder der einzelnen Kanäle nahezu identisch und somit dominierend. Ein mit originaler Bestrahlungsgeometrie unter dem Azimut ϕ_i berechnetes Relief wird also den originalen Bilddaten ähneln und kaum in der Lage sein, Artefakte in einem mittels Photoklinometrie abgeleiteten DGM aufzudecken. Daher erscheint es zweckmäßig, Reliefdarstellungen auch senkrecht zur originalen Bestrahlungsrichtung unter Azimutalwinkeln $\phi_i + 90^\circ$ bzw. $\phi_i - 90^\circ$, den durch Photoklinometrie am schwächsten kontrollierten Richtungen, zu berechnen.

Im Rahmen des *HRSC DTM Tests* haben HEIPKE et al. (2006, 2007) das Auflösungsvermögen, welches nicht mit der nominellen Facettengröße übereinstimmt sondern in der Regel darunter liegt, anhand der RMSs der Neigungen über verschiedene Basislinien untersucht. Dieser Ansatz ist allerdings für die vergleichsweise kleinen Bearbeitungsfenster in dieser Arbeit ungeeignet, zumal die Ergebnisse zusätzlich durch Randeffekte beeinflusst würden; er wird nicht weiter verfolgt. Ähnliches gilt für die Studie zur Erkennbarkeit von Kratern in Reliefs: Während dies qualitativ leicht geprüft werden kann und wird (Praxisbeispiel im Abschnitt 6.4), erscheint die größenabhängige Quantifizierung von HEIPKE et al. (2007) aufgrund der kleinen Bearbeitungsgebiete hier nicht praktikabel.

Die Genauigkeit photogrammetrisch bestimmter DGMs ist von der Reliefenergie im Bearbeitungsgebiet abhängig. Sie nimmt mit wachsendem Gradienten ab, da sich Ungenauigkeiten bei der (horizontalen) Bildzuordnung dann stärker auf die abgeleiteten (vertikalen) Höhen auswirken. Nach KOPPE (siehe z.B. KAREL & KRAUS 2006) berechnet sich die Höhengengenauigkeit σ_H eines DGMs anhand eines konstanten und eines von der Geländeneigung α abhängigen Terms:

³⁸ Für die qualitative Beurteilung des DGMs spielt die Albedo im Reflexionsmodell keine Rolle. Dieser Faktor dient lediglich zur Steuerung des Kontrastes im Relief.

$$\sigma_H = \sigma_0 + \sigma_G \tan \alpha \quad (5.4)$$

Die Parameter σ_0 und σ_G können in einer vermittelnden Ausgleichung aus den Standardabweichungen der Einzelhöhen und den lokalen Geländeneigungen bestimmt werden. Damit lässt sich schließlich eine Genauigkeitsaussage für das gesamte DGM treffen. KRAUS (2004) gibt für stereophotogrammetrisch berechnete DGMs empirische Werte an, welche auf der Flughöhe h und der Kamerakonstanten c basieren. Für HRSC-Aufnahmen aus 300 km Höhe würde demnach gelten:

$$\sigma_H = \pm 0,00015 \left(h + \frac{h}{c} \tan \alpha \right) = \pm (45 \text{ m} + 250 \text{ m} \tan \alpha) \quad (5.5)$$

Der Faktor 0,00015 stammt aus der analogen terrestrischen (Luftbild-)Photogrammetrie und erscheint in Anbetracht der Erfahrungen mit der Verarbeitung von HRSC-Bilddaten für die daraus abgeleiteten DGMs der Mars-Oberfläche zu pessimistisch (vgl. auch HEIPKE et al. 2006, 2007). Prinzipiell ist aber die neigungsabhängige Quantifizierung nach der Koppeschen Formel sinnvoll.

Abschließend sei auf den Überblick von KAREL & KRAUS (2006) über Bewertungskriterien für DGMs hingewiesen, welche aus Objektpunktwolken interpoliert werden (anhand von Laserscanning- oder Bildzuordnungsergebnissen). Ein Beispiel ist die lokale Punktdichte; siehe dazu auch GWINNER et al. (2005) für die Auswertung von HRSC-Daten. Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten DGMs liegen jedoch ohne den Zwischenschritt der Objektpunktbestimmung direkt im regelmäßigen Lageraster vor. Somit besteht ein großer Vorteil des vorgestellten Ansatzes auch darin, dass mittlere Fehler für jede einzelne Höhe als Ergebnis der Ausgleichung vorliegen und als lokale Qualitätsmaße des DGMs dienen können.

5.5.1.3 Reflexionseigenschaften

Reflexionsparameter, die räumlich aufgelöst in Facetten vorliegen, können als Bildmatrix dargestellt werden, beispielsweise die Albedokarte (*albedo map*). Abhängig vom jeweiligen photometrischen Modell sind weitere Plausibilitätskontrollen der bestimmten Werte denkbar. So sollten die Parameter b und c der Double-Henyey-Greenstein-Phasenfunktion unter Berücksichtigung der im Abschnitt 5.3.2 gefundenen Besonderheiten in Bezug auf die Modellierung aus HRSC-Daten innerhalb des L-förmigen Bereiches im b - c -Diagramm entsprechend Abbildung 3.4 bzw. Abbildung 5.3 liegen.

Die radiometrischen Eigenschaften der Atmosphäre können anhand ihrer mittleren Fehler und des Qualitätsfaktors der optischen Dichte beurteilt werden (siehe Abschnitt 4.8.1.1).

5.5.2 Gemeinsame Bewertung der Objektmodelle

Die oben angesprochene Reliefdarstellung des DGMs lässt sich erweitern, indem das für die Photoklinometrie genutzte Reflexionsgesetz unter der bei der Datenaufnahme herrschenden Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie mit den abgeleiteten Materialparametern angesetzt und außerdem noch der Atmosphäreneinfluss berücksichtigt werden. Damit wird die gemeinsame geometrische und radiometrische Oberflächenmodellierung umgekehrt und die Ergebnisse sollten den aus den originalen HRSC-Bilddaten abgeleiteten Pseudo-Orthobildern entsprechen. Die Übereinstimmung kann jeweils durch Bildkorrelation nach Gleichung (5.3) quantifiziert werden.³⁹

Eine Möglichkeit zur gemeinsamen, qualitativen Beurteilung von DGM und Orthobild ist die Ableitung von Höhenlinien aus dem DGM, welche wie in einer topographischen Bildkarte dem Orthobild überlagert

³⁹ Da die Einflüsse von Luftlicht (Helligkeit) und optischer Dichte (Kontrast) über jedes Pseudo-Orthobild nahezu konstant sind, muss die Atmosphäre für die Bildkorrelation nicht explizit berücksichtigt werden. Die Korrelationskoeffizienten sind davon unbeeinflusst.

werden. Damit lässt sich die Plausibilität des DGMs prüfen: Höhenlinien sollten die im Bild erkennbaren morphologischen Formen beschreiben und beispielsweise keine Kraterränder schneiden.

5.5.3 Unabhängige Vergleichsmöglichkeiten

5.5.3.1 MOLA-Profile als Höhenreferenz

Die MOLA-Messungen (Abschnitt 2.3) stellen die bislang genauesten, global verfügbaren Höhendaten der Mars-Oberfläche dar. Somit liegt es nahe, die hier erzielten DGMs mit dieser Referenz zu vergleichen. Um die Fehler der Interpolation seitens MOLA auszuschließen – das globale DGM (MEGDR) ist teilweise über mehrere Kilometer interpoliert –, werden Originaldaten (PEDR) verwendet und Höhendifferenzen zum HRSC-DGM an den Positionen der MOLA-Messpunkte berechnet. Der Einfluss der notwendigen bilinearen Interpolation innerhalb des HRSC-DGMs ist aufgrund der kleinen Facettengrößen deutlich geringer.

Im ebenen Gelände weist MOLA mit 1 m eine sehr gute Höhengenaugigkeit auf und kann damit als absolute Referenz angesehen werden. Mit zunehmender Geländeneigung nimmt diese Genauigkeit allerdings ab. Zudem wirken sich Lagefehler der MOLA-Profile hier systematisch aus. Grundsätzlich sollten die Vergleichsdaten eine mindestens dreifache Genauigkeit aufweisen und gleichmäßig über das HRSC-DGM verteilt sein. Bewertungskriterien sind dann die einzelnen Höhendifferenzen Δh in n MOLA-Punkten, ihr betragsmäßiges Maximum sowie der aus den Differenzen abgeleitete RMSE:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum \Delta h^2}{n}} \quad (5.6)$$

Damit lässt sich eine Ausreißerschranke definieren, üblicherweise 3 RMSE. Die mittlere Höhendifferenz sowie die Standardabweichung der Einzeldifferenzen – auf den mittleren Höhenunterschied reduziert – werden dann ohne Ausreißer berechnet (vgl. HÖHLE & PUTOCKOWA 2006). Die 3-RMSE-Schranke sollte geeignet sein, die zum Teil grob fehlerhaften MOLA-Messungen zu erkennen und aus den Vergleichen auszuschließen. Für die Beurteilung der MOLA-Qualität selbst können dabei auch sich kreuzende Profile analysiert werden.

Eine neigungsabhängige und daher genauere Quantifizierung der absoluten Genauigkeit der abgeleiteten HRSC-DGMs wird durch die Parametrisierung der Höhendifferenzen anhand der Koppeschen Formel (5.4) erzielt.

5.5.3.2 Der HRSC DTM Test

Im Rahmen des *HRSC DTM Tests* (HEIPKE et al. 2006, 2007) wurden zwei Regionen der Mars-Oberfläche untersucht: *Valles Marineris (Candor Chasma)* und *Nanedi Valles*. Letztere ist 300 km x 240 km groß und umfasst auch einen Großteil des in Abbildung 6.1 dargestellten Gebietes. Hier sind von acht teilnehmenden Institutionen bzw. Arbeitsgruppen insgesamt 19 DGMs berechnet worden, die zumeist auf klassischer Bildzuordnung basieren (u.a. GWINNER et al. 2005, HIRSCHMÜLLER et al. 2006, KIRK et al. 2006, SCHOLTEN et al. 2005) oder die Resultate durch Photoklinometrie bzw. Shape-from-Shading verfeinern (DORRER et al. 2005, KIRK et al. 2006).

Die DGMs wurden im Rahmen des Tests mit dem MOLA-DGM sowie exemplarisch mit zwei Profilen verglichen, wobei absolute Höhendifferenzen und RMSE-Werte berechnet wurden. Die qualitative Beurteilung bestand aus der Überlagerung von Orthobild und Höhenlinien (vgl. GEHRKE & NEUKUM 2005), das Auflösungsvermögen wurde anhand der größenabhängigen Erkennbarkeit von Einschlagkratern sowie mittels Neigungs-RMSs über verschiedene Basislängen quantifiziert.

Im Ergebnis wurden die mit dem Verfahren von GWINNER et al. (2005, 2007) erzielten Ergebnisse als die besten („best overall results in terms of accuracy and fine detail“ – HEIPKE et al. 2007) bewertet; seither beruht auch die Standardprozessierung der HRSC-Daten am DLR auf diesem Verfahren. Für die hier

erzielten Ergebnisse im Bereich der *Nanedi Valles* dienen sowohl dieses als auch das mit dem Shape-from-Shading-Ansatz von DORRER et al. (2005) verfeinerte DGM – basierend auf den Bildzuordnungsergebnissen von Scholten et al. (2005) – als Vergleichsmöglichkeiten.⁴⁰ Diese Modelle werden analog zu HEIPKE et al. (2007) im Folgenden als *DLR-Gwinner* und *DLR-Scholten/UniBwM* bezeichnet. Für die Vergleiche ist zu beachten, dass dieselben Eingangsdaten verwendet wurden und damit auch teils gleiche systematische Einflüsse vorliegen, z.B. aus den HRSC-Orientierungsdaten. Die Ergebnisse des *HRSC DTM Tests* sollten daher auch eine ähnliche Genauigkeit aufweisen wie die im Rahmen dieser Arbeit abgeleiteten DGMs (siehe dazu Diskussion im Abschnitt 6.7.2).

5.5.3.3 Materialeigenschaften der Mars-Oberfläche

Im Gebiet des Kraters *Gusev* und der sich nördlich anschließenden *Apollinaris Patera* (Abbildung 6.2) wurden von PINET et al. (2005) und JEHL et al. (2006, 2008) Hapke-Parameter aus HRSC-Daten bestimmt. Diese Analysen basieren auf einer Reduktion der geometrischen Bodenauflösung auf 1,6 km zugunsten der Erhöhung der radiometrischen Auflösung. Dabei haben PINET et al. (2005) zwei Orbits analysiert und ohne DGM gearbeitet, d.h. die Mars-Oberfläche als eben angenommen und in ihrer Modellierung Hanglagen ausgeschlossen. JEHL et al. (2006, 2008) haben diese Studie anhand neuer Bilddaten unter Einbeziehung eines HRSC-DGMs erweitert. Basierend auf dem gleichen Ansatz haben PINET et al. (2006) das Gebiet der *Spirit*-Landestelle modelliert. In allen Berechnungen wurden allerdings Atmosphären- und Oberflächeneinflüsse nicht getrennt (JEHL 2007, JEHL et al. 2008), sodass die oberflächenbezogenen Ergebnisse dieser Arbeit nur bedingt vergleichbar sind.

Auch aus den Daten der verschiedenen Mars-Landungen wurden lokal Hapke-Parameter abgeleitet – vgl. Übersicht in JOHNSON et al. (2008). Die in *Gusev* aus *Spirit*-Daten bestimmten Materialparameter stimmen demnach mit den beschriebenen HRSC-basierten Auswertungen von PINET et al. (2006) im Bereich der Landestelle überein.

SODERBLOM et al. (2006a) haben verschiedene Reflexionsmodelle an Daten der *Wide Field Planetary Camera 2* (WFPC2) des *Hubble Space Telescops* der Jahre 1996-2005 angepasst, u.a. das Lambert- und Hapke-Modell. Obwohl hier ein völlig anderer Auflösungsbereich als bei HRSC-Daten vorliegt, werden die Ergebnisse dort, wo keine anderen Vergleichsdaten zur Verfügung stehen, zur Plausibilitätsbeurteilung der abgeleiteten Reflexionsparameter herangezogen.

5.5.3.4 Atmosphärenparameter

Die optische Dichte der Mars-Atmosphäre über dem *Gusev*-Krater wurde nach der auch hier verwendeten Stereomethode von HOEKZEMA (2009) bzw. HOEKZEMA et al. (2009) bestimmt, allerdings nur für einen HRSC-Bildstreifen. Obwohl die Atmosphäre sowohl zeitlich als auch räumlich variiert, können diese Daten dennoch einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der hier erzielten Ergebnisse geben.

Die grundsätzliche Plausibilität der Resultate lässt sich auch im Vergleich zu regelmäßig und langfristig aufgezeichneten Daten überprüfen, wie sie beispielsweise von den *Viking*-Landern zur Verfügung stehen (z.B. KAHN et al. 1992).

⁴⁰ Obwohl in dem zweiten DGM naturgemäß keine globale quantitative Verbesserung erreicht wurde (z.B. Differenzen zu MOLA), stellt der *HRSC DTM Test* den Beitrag der Photoklinometrie bzw. Shape-from-Shading für die lokale Verfeinerung heraus.

6 Ergebnisse der Anwendung auf HRSC-Daten

Die praktische Auswertung von HRSC-Daten mit dem im Kapitel 4 vorgestellten Ansatz zur geometrischen und radiometrischen Modellierung erfolgt für fünf charakteristische Gebiete der Mars-Oberfläche. Diese unterscheiden sich hinsichtlich

- **Größe** (zwischen 2,8 km x 2,8 km und 25,0 km x 25,0 km),
- abgebildeter morphologischer **Formen** (Krater, Täler und Tafelberge) und **Reliefenergie**,
- **Materialeigenschaften**,
- **Bildstruktur**, d.h. Textur und Kontrast,
- **Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie** sowie
- **Auflösung** der Bilddaten (von etwa 11 m bis 450 m pro Bodenpunkt).

Je nach Gebiet, Eigenschaften der HRSC-Bilder sowie den zur Verfügung stehenden Vergleichsdaten werden bei der Modellierung und vor allem bei der Darstellung der Ergebnisse Schwerpunkte betreffs der Geometrie oder der Radiometrie gesetzt. Aus der Fülle der im Abschnitt 5.5 aufgezeigten Visualisierungs- und Bewertungsmöglichkeiten werden dabei jeweils repräsentative Darstellungen ausgewählt. Zum Abschluss des Kapitels werden die wesentlichen Ergebnisse gegenübergestellt; anhand dessen wird die Modellierung diskutiert.

Bei der Anwendung steht naturgemäß das zur integrierten Oberflächenmodellierung erweiterte Facetten-Stereosehen im Vordergrund. Der Grundansatz wurde bereits mit terrestrischen Daten und auch für den Mars ausführlich untersucht, letzteres sowohl anhand simulierter Bilddaten aus den Ergebnissen unterschiedlicher Mars-Missionen (ANDERSSOHN 2004) als auch mit HRSC-Daten (GEHRKE & HAASE 2006a, 2006b, BISCHOFF 2007, GEHRKE & BISCHOFF 2007, GEHRKE 2007, HAASE 2007).

6.1 Die Bearbeitungsgebiete im Überblick

Von den Bearbeitungsgebieten liegen drei im Bereich der *Nanedi Valles* (Abbildung 6.1) und weitere zwei im *Gusev*-Gebiet (Abbildung 6.2). Hier existieren neben global vorhandenen MOLA-Höhen Vergleichsdaten aus dem *HRSC DTM Test (Nanedi Valles)* sowie unabhängig bestimmte Reflexionsparameter des Hapke-Modells (*Gusev*).

Im Einzelnen werden die folgenden, für den Mars repräsentativen Gebiete modelliert:

- Unbenannter **Einschlagkrater** (Abbildung 6.1, oben): Da Krater das Erscheinungsbild der Mars-Oberfläche maßgeblich prägen, liegt die Modellierung eines typischen Exemplars nahe. Der Schwerpunkt wird hier auf die DGM-Berechnung gelegt: Die sukzessive geometrische Verfeinerung lässt sich eindrucksvoll demonstrieren, indem sich die Form des Kraterrandes schrittweise aus dem niedrig auflösenden MOLA-DGM erhebt. Ein Modell des gesamten Kraters wird aus Einzelfenstern als Mosaik gebildet.
- **Talkomplex** in den *Nanedi Valles* (Abbildung 6.1, mittig): Dieses Gebiet zeigt eine im Vergleich zum Kraterrand heterogene Struktur. Der Talverlauf ist von Ebenen umgeben, feine Texturen liegen nur an den Rändern vor; es gibt größere Schattenbereiche. An diesem Beispiel werden die vier Modellierungsansätze gegenübergestellt. Ergebnisse sind sowohl das DGM als auch Reflexionsmodelle.

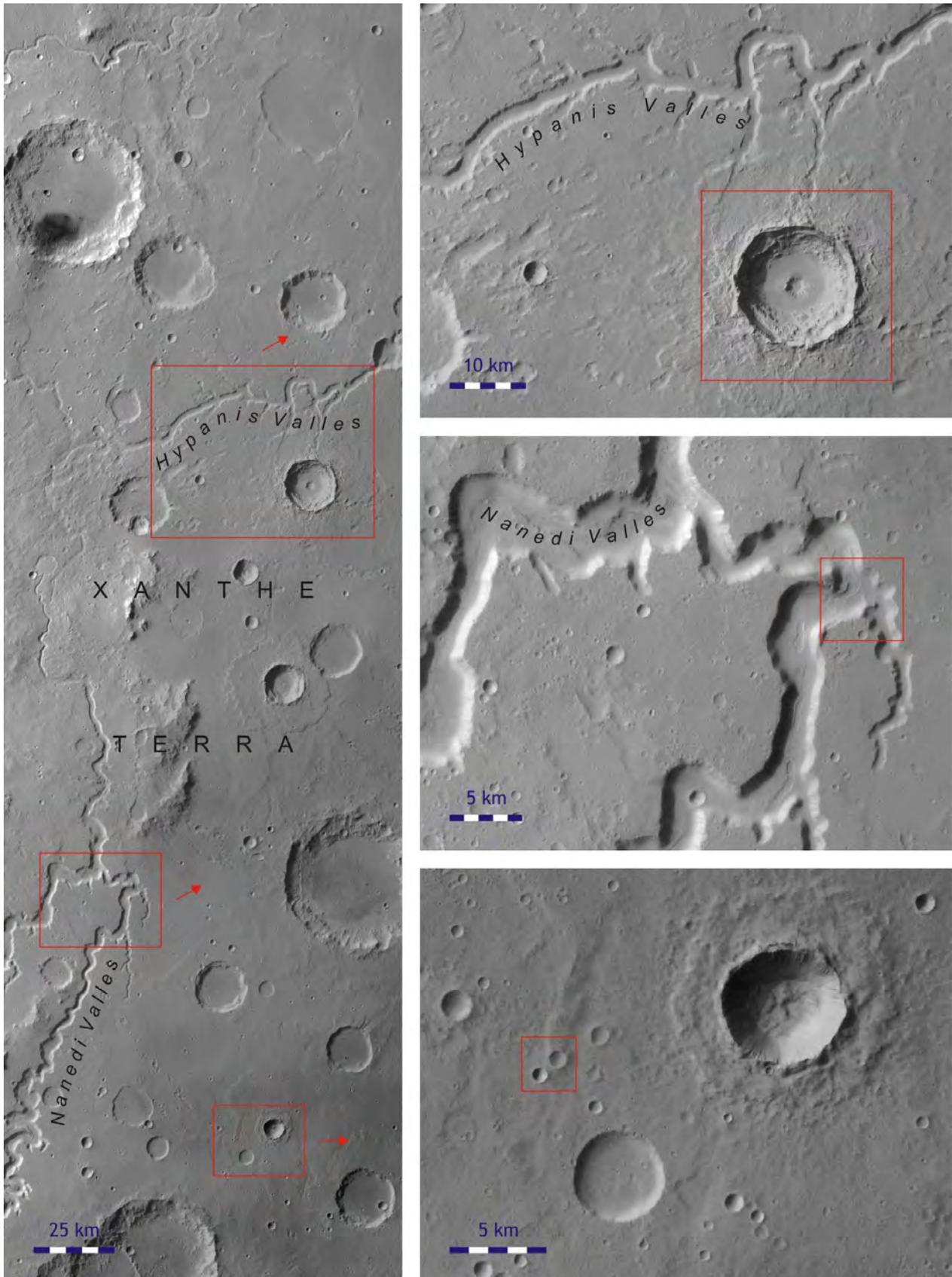


Abbildung 6.1: Bearbeitungsgebiete in der Region der *Nanedi Valles* (*Xanthe Terra*).

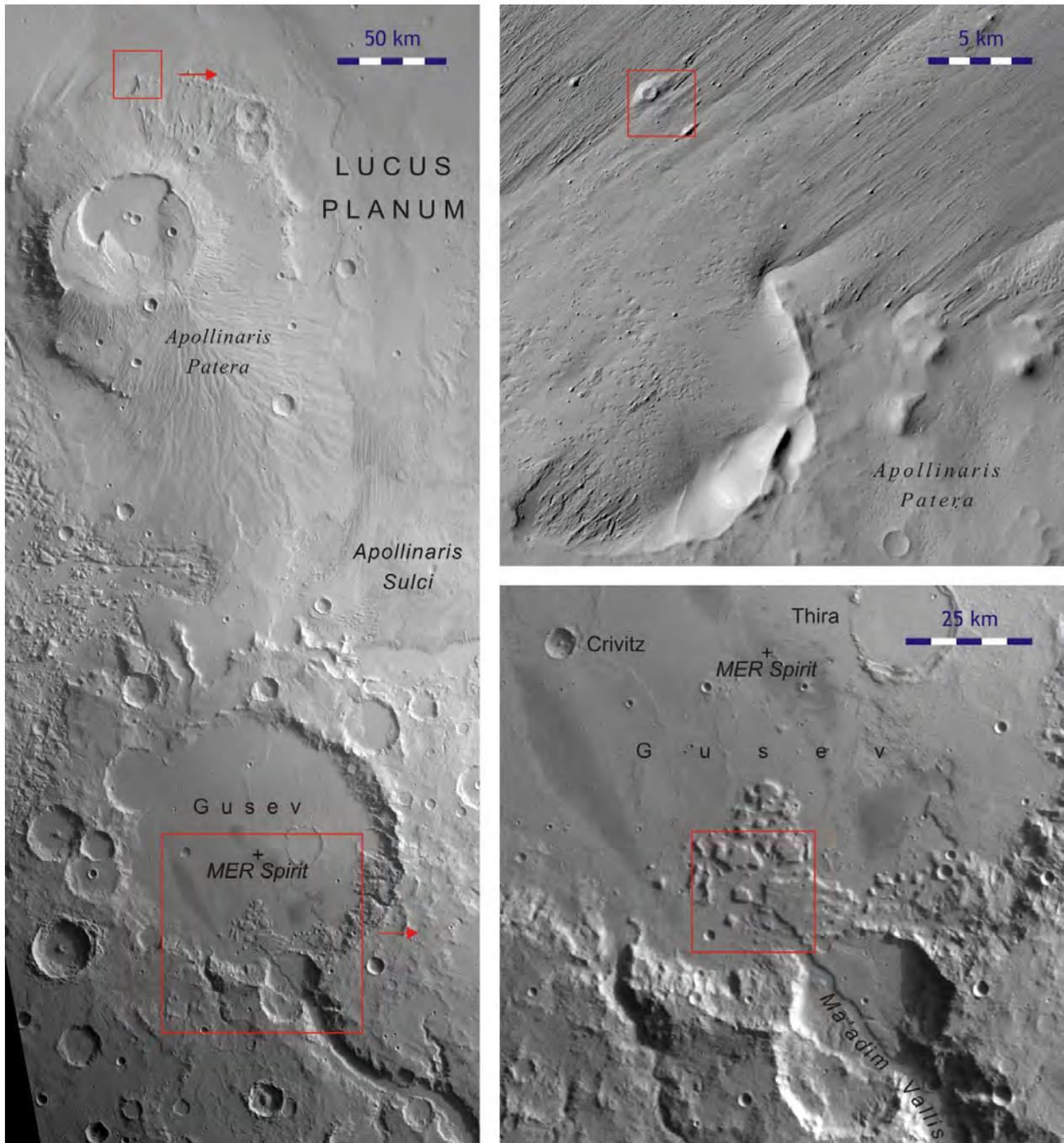


Abbildung 6.2: Bearbeitungsgebiete in der Region *Gusev* und *Apollinaris Patera*.

- Zwei **kleine Krater** (Abbildung 6.1, unten): In Anlehnung an die Studie zur Auflösung von Kraterformen im Rahmen des *HRSC DTM Tests* wird die geometrische Modellierung zweier Einschlagkrater unter 1 km Durchmesser analysiert. Dieses Gebiet zeigt auch im Bereich der Krater selbst nur wenig Textur und stellt somit eine Herausforderung an die Bildzuordnung dar. Der Gewinn der Erweiterung des Facetten-Stereosehens um die Photoklinometrie wird hier besonders deutlich.
- Südliches **Tafelbergland** im *Gusev*-Krater (Abbildung 6.2, unten): In dieser Region steht die radio-metrische Analyse im Vordergrund. Die verwendeten HRSC-Daten (Orbit 648) sind aus großer Höhe und damit sehr unterschiedlichen Aufnahmewinkeln aufgenommen. So bietet sich eine günstige Konfiguration sowohl für die Bestimmung der optischen Dichte als auch für die darauf

aufbauenden Ableitungen richtungsabhängiger Reflexionseigenschaften sowie anschließend der Parameter des Hapke-Modells.

- **Lavafluss** an der *Apollinaris Patera* (Abbildung 6.2 oben): Der integrierte Ansatz kann prinzipiell auch benutzt werden, wenn wie in diesem Gebiet die optische Dichte der Atmosphäre nicht zuverlässig bestimmbar ist. Es wird demonstriert, dass sich ein plausibles DGM ableiten lässt. Die berechneten Reflexionsparameter stellen dann allerdings keine reine Oberflächeneigenschaft dar.

Da die Modellierung der Oberfläche das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist, wird bei nachfolgenden Analysen der einzelnen Gebiete nicht detailliert auf die Atmosphäre eingegangen. Die Parameter werden in der abschließenden Diskussion im Abschnitt 6.7.3 gegenübergestellt.

6.2 Einschlagkrater: Geometrische Modellierung

Für einen unbenannten Einschlagkrater im Gebiet der *Nanedi Valles* bei 313,4° Ost und 9,0° Nord werden die Ergebnisse aus dem regularisierten Ansatz des Facetten-Stereosehens vorgestellt. Die Berechnung basiert auf dem Algorithmus nach WEISENSEE (1992), erweitert um Glattheitsbedingungen, welche in Abhängigkeit von den Gradienten der Reflexionsfaktoren in X und Y gewichtet sind.

Ziel ist die Demonstration, dass das Facetten-Stereosehen zur hochauflösenden, detaillierten geometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche geeignet ist. Die Ergebnisse werden denen der Bildzuordnung aus dem *HRSC DTM Test (DLR-Gwinner)* gegenübergestellt.

6.2.1 Bearbeitungsgebiet und HRSC-Daten

Das Bearbeitungsgebiet umfasst 25,0 km x 25,0 km und deckt den Krater vollständig ab (Abbildung 6.3). Es wurde im *Mars-Express*-Orbit 894 mit Bodenaufösungen bis zu 20 m/Pixel im Nadirkanal von der HRSC erfasst. Die äußeren Stereokanäle wurden dabei im Makropixelformat 2 x 2, die dazwischen liegenden Photometriekanäle im Format 4 x 4 aufgenommen. Letztere haben Aufösungen von über 70 m/Pixel. Für die rein geometrische Modellierung wird daher auf sie verzichtet. Eine Übersicht über die Eigenschaften der verwendeten HRSC-Bilddaten gibt Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Orbit 894, Beobachtungsgeometrie für den südlichen Kraterrand.

Kanal	Auflösung	Bestrahlungswinkel θ_i		Beobachtungswinkel θ_r		Phasenwinkel α	
		Niveau	Facetten	Niveau	Facetten	Niveau	Facetten
Stereo 1	43,8 m	69,8°	17,7° - 90,0°	22,1°	0,0° - 84,3°	59,7°	59,4° - 60,0°
Nadir	20,0 m	70,0°	17,9° - 90,0°	3,7°	0,0° - 63,1°	66,8°	66,4° - 67,1°
Stereo 2	36,7 m	70,1°	18,1° - 90,0°	22,3°	0,0° - 78,3°	76,7°	76,3° - 77,0°

6.2.2 Modellierung des gesamten Kraters als Mosaik

Um die Mosaikierung von Oberflächenmodellen aus benachbarten, überlappenden Bearbeitungsfenstern darzustellen, wird der gesamte Krater aus den Daten von 11 x 11 Einzelfenstern zusammengesetzt. In diesen erfolgen die Berechnungen unabhängig voneinander nach dem regularisierten Ansatz. Für die Auflösung des Orthobildes wird die des Nadirkanals von 20 m gewählt, das DGM wird mit einem Faktor 4, d.h. 80 m Lageauflösung, berechnet. Die Fenster bestehen aus jeweils 129 x 129 Surfeln, die DGMs aus 33 x 33 Stützstellen, von denen fünf überlappen.

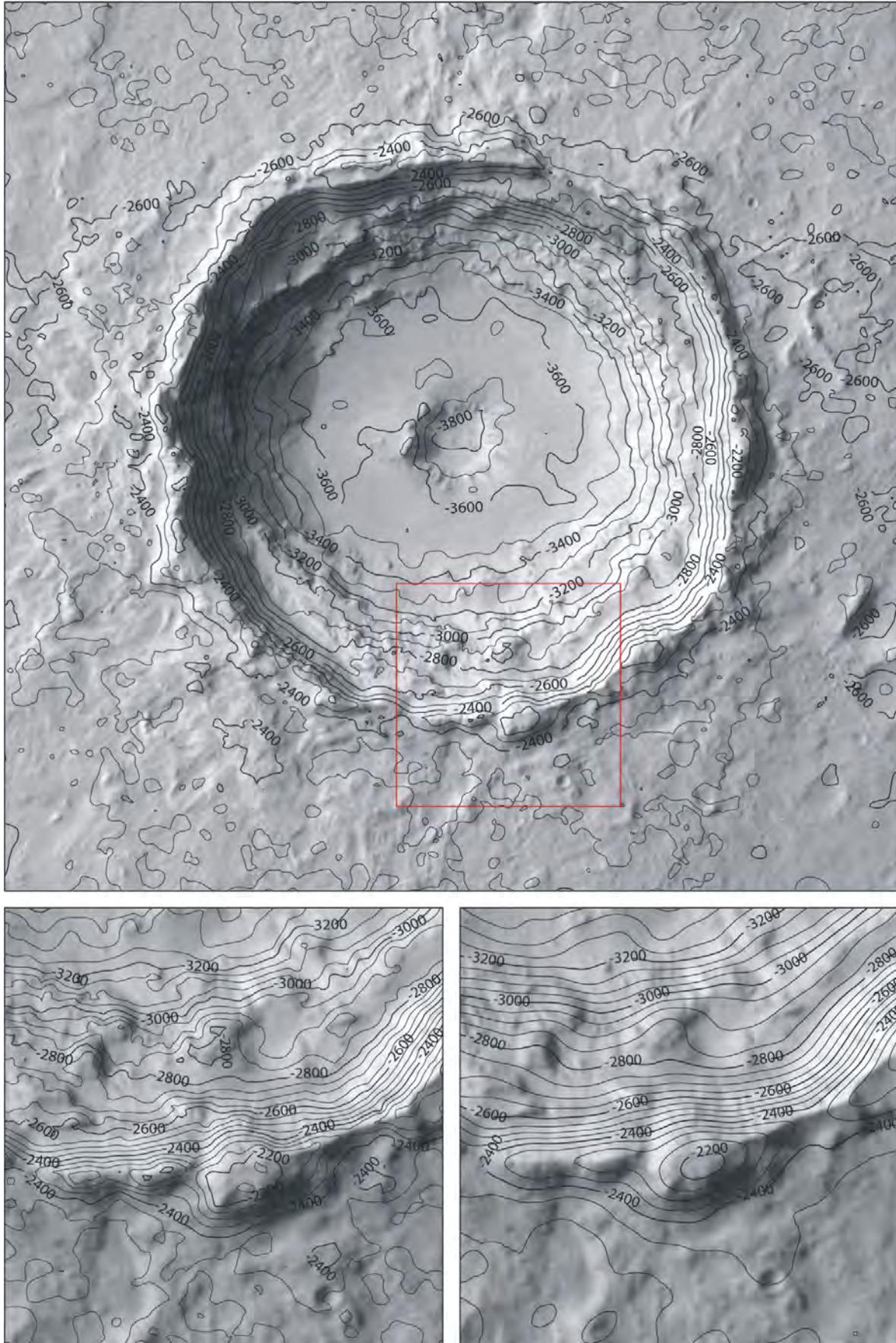


Abbildung 6.3: Überlagerung von Höhenlinien und Orthobild des gesamten Kraters (Gebiet oben: 25,0 km x 25,0 km); vergrößerter Ausschnitt am Kraterrand (unten links) und Vergleich mit dem DGM DLR-Gwinner (unten rechts).

Die in Abbildung 6.3 dargestellte Überlagerung der beiden Ergebnisse – Orthobildmosaik und aus dem DGM abgeleitete Höhenlinien – zeigt, dass der regularisierte Ansatz grundsätzlich zur Mosaikierung geeignet ist; im Höhenlinienbild sind keine Artefakte bzw. Übergangsbereiche erkennbar. Die Berechnung der Übergänge zwischen den einzelnen DGMs erfolgt hier durch Mittelung der Höhen in den betreffenden Stützstellen, wobei die Werte mit zunehmender Entfernung zum Modellrand gewichtet sind. Die Rand- und Eckpunkte selbst bleiben unbeachtet, da ihre Bestimmung im Vergleich zu den anderen Stützstellen eine geringere Redundanz aufweist und demzufolge die mittleren Höhenfehler größer sind (siehe dazu auch Abbildung 6.15 im nachfolgenden Teilabschnitt). Die Höhendifferenzen zwischen den Einzelmodellen liegen im Rahmen der mittleren Fehler.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Möglichkeit der Mosaikierung hier zwar prinzipiell gezeigt wird, dass sie aber keinesfalls einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt. Die Modellierung der Übergänge bedarf weiterer Untersuchungen, ebenso die voneinander abhängige Berechnung der überlappenden Einzel Fenster, in der die bereits bekannten Ergebnisse des Nachbarfensters in die aktuelle Ausgleichung einfließen sollten.

Der in Abbildung 6.3, unten, vorgenommene Vergleich des in diesem Rahmen abgeleiteten DGMs mit dem aus denselben HRSC-Daten mittels klassischer Bildzuordnung berechneten (*DLR-Gwinner*) deutet das Potential des Facetten-Stereosehens an: Trotz einer geringeren nominellen Lageauflösung – 80 m im Vergleich zu 50 m – führt das Facetten-Stereosehen zu einer detaillierteren Modellierung der Morphologie des Kraterandes; die Höhenlinien aus dem DGM *DLR-Gwinner* sind glatter.

Ein unabhängiger Vergleich des hier berechneten DGMs wird durch MOLA-Daten ermöglicht. Abbildung 6.4 zeigt die Höhendifferenzen in den MOLA-Messpunkten. Diese werden als Sollwerte aufgefasst, d.h. für positive Differenzen liegt das HRSC-DGM niedriger und für negative höher.

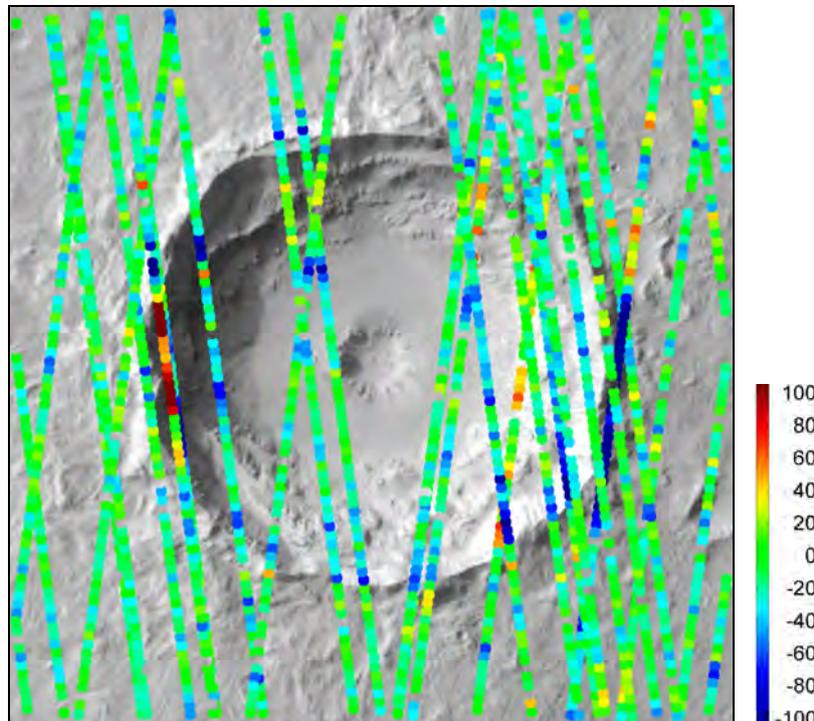


Abbildung 6.4: Höhendifferenzen zu MOLA-Punkten. Zahlenangaben in [m].

Die größten Höhendifferenzen treten erwartungsgemäß in texturarmen Bereichen des Kraterbodens, wo die für die Bildzuordnung notwendigen Gradienten klein sind, sowie an den Hanglagen auf. Dort wirken sich Lagefehler am stärksten auf Höhenunterschiede aus, was insbesondere an dem MOLA-Profil am östlichen Kraterand deutlich wird, welches die größten Differenzen zum HRSC-DGM zeigt: Kreuzende

Profile stimmen gut mit dem HRSC-DGM überein und weichen ebenfalls von dem betreffenden MOLA-Profil ab, was auf (Lage-)Fehler in diesem hindeutet. Am Westrand des Kraters besteht eine vergleichbare Diskrepanz zwischen zwei eng beieinander liegenden, parallel verlaufenden MOLA-Profilen. Die betreffenden Höhendifferenzen werden anhand der 3-RMSE-Schranke als Ausreißer identifiziert und bestätigen somit die theoretischen Überlegungen des Abschnitts 5.5.3.1. Aus den verbleibenden Werten ergibt sich eine Gesamtdifferenz von -12,1 m. Das HRSC-DGM liegt etwas höher. Die Differenz resultiert aus (zufälligen) Fehlern im DGM und in MOLA sowie aus (sich hier systematisch auswirkenden) Fehlern der äußeren Orientierung der HRSC; die Genauigkeit letzterer wird von SPIEGEL et al. (2005) mit 30 m angegeben, siehe auch Abschnitt 2.2.3.2. Die Höhendifferenz liegt unterhalb dessen.

Die von der Geländeneigung α abhängige Streuung der Höhendifferenzen ist

$$\sigma_H = \pm(10,3 \text{ m} + 46,4 \text{ m} \tan \alpha) \quad (6.1)$$

und damit geringer als in Formel (5.5) für die analoge Luftbildphotogrammerie angegebenen, wonach für die HRSC bei einer Aufnahmeentfernung von $h = 501 \text{ km}$ (Nadirkanal) folgen würde:

$$\sigma_H = \pm 0,00015 \left(h + \frac{h}{c} [\text{m}] \tan \alpha \right) = \pm(75 \text{ m} + 429 \text{ m} \tan \alpha) \quad (6.2)$$

Dies bestätigt die im Abschnitt 5.5.1.2 angezweifelte Gültigkeit des Faktors 0,00015 für die Aufnahme-konstellation der HRSC auf *Mars Express*. Hier wird eine deutlich bessere Genauigkeit erreicht, der Faktor liegt tatsächlich unter 0,00002. Siehe auch Gegenüberstellung aller Bearbeitungsgebiete in Tabelle 6.18.

6.2.3 DGM-Verfeinerung am Beispiel des südlichen Kraterrandes

An einem Kraterrand lässt sich die sukzessive Verfeinerung der DGM-Auflösung besonders eindrucksvoll zeigen. Daher wird ein $6,4 \text{ km} \times 6,4 \text{ km}$ großer Ausschnitt am Südrand des Einschlagkraters separat in einem Bearbeitungsfenster berechnet.

6.2.3.1 Vorgehensweise

Aus der Gebietsgröße wird deutlich, dass das als Startwert verwendete MOLA-DGM mit einem Punkt-abstand von 5 km nur den Trend des Geländes wiedergeben kann und insbesondere den Kraterrand nicht enthält (Abbildung 6.5, oben links, und Abbildung 6.6, rechts). Diese Höhenfehler von teilweise mehr als 500 m führen zu Lageversätzen von etwa 200 m in den Stereokanälen, d.h. insgesamt $400 \text{ m} = 10$ Surfel bei der hier gewählten Orthobildauflösung von 40 m/Surfel (Abbildung 6.6, links). Um eine große Zahl korrespondierender Punkte in jeder DGM-Facette und damit die Konvergenz der Modellierung sicher-zustellen, wird die Berechnung mit 32×32 Surfeln pro Facette gestartet. Die endgültige Auflösung beträgt 4×4 Surfel bzw. 160 m, vgl. Parametrisierung in Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2: Parametrisierung und Statistik zur Verfeinerung der DGM-Auflösung.

Schritt	Stützstellen	Auflösung [m]	Surfel pro Facette	Iterationen	Hebung [m]	Änderung in Stützstellen	
						Median [m]	Signifikanz
MOLA		5 000 x 5 000					
1	6 x 6	1 280 x 1 280	32 x 32	4	52,5	92,5	20,0
2	11 x 11	640 x 640	16 x 16	5	-9,5	57,5	6,7
3	21 x 21	320 x 320	8 x 8	3	-4,3	27,7	2,5
4	41 x 41	160 x 160	4 x 4	4	-0,3	14,1	0,9

6.2.3.2 Sukzessive Verbesserung von DGM und Orthobild

Abbildung 6.5 zeigt die Herausbildung des Kraterrandes aus dem MOLA-DGM, die zu großen Teilen bereits in der ersten Iteration eintritt. Das Gebiet hebt sich um mehr als 50 m. Einhergehend mit der schrittweisen Halbierung der Lageauflösung wird schließlich die iterative DGM-Verfeinerung dargestellt, wobei der regularisierte Ansatz jeweils in wenigen Iterationen konvergiert. Erwartungsgemäß nimmt dabei die Höhenänderung in den Stützstellen stetig ab und ist für die letzte Facettierungsstufe im Median nicht mehr signifikant (Tabelle 6.2), was unterstreicht, dass der Informationsgehalt der Bilddaten ausgeschöpft ist. Dementsprechend zeigt das auf dem endgültigen DGM basierende Orthobild im Gegensatz zum ersten Mittelbild keine Lageversätze mehr und wirkt scharf – siehe Gegenüberstellung in Abbildung 6.6.

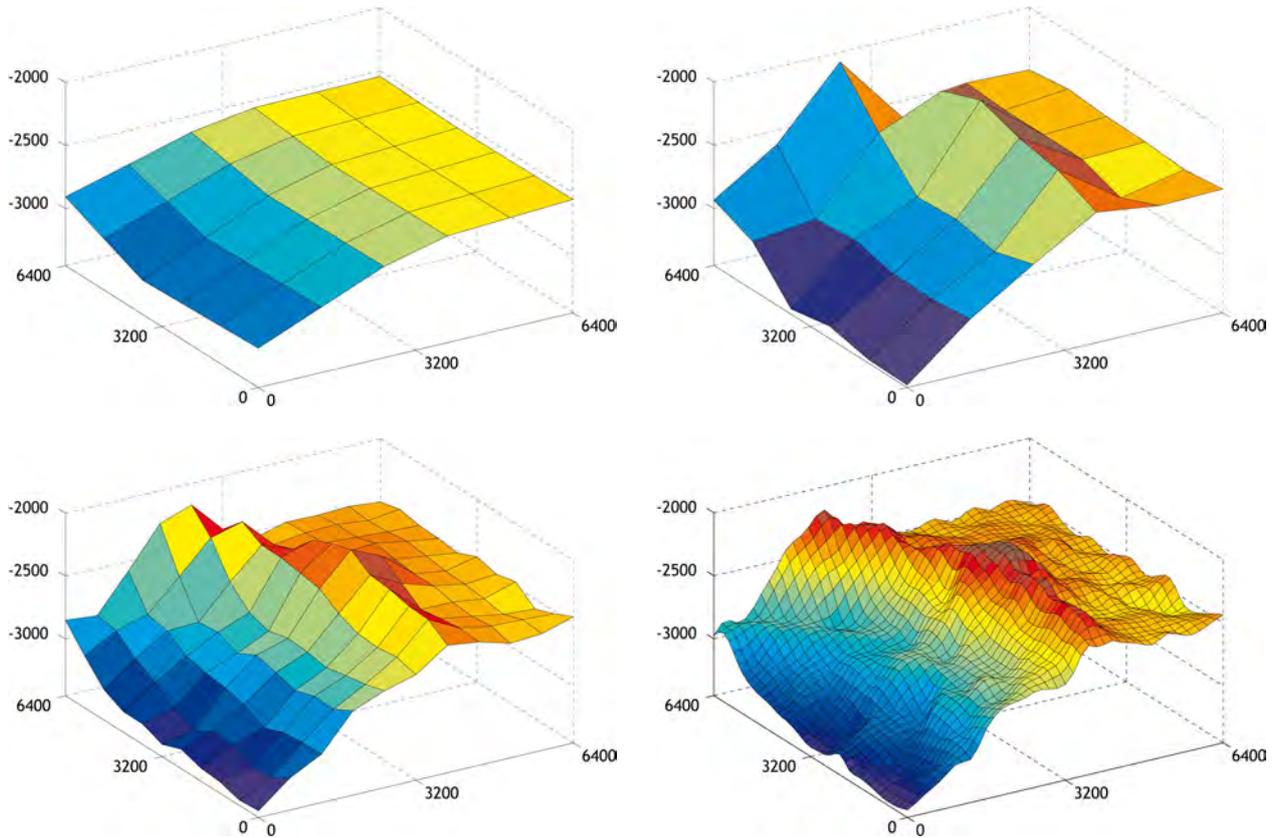


Abbildung 6.5: Sukzessive DGM-Verfeinerung des Kraterrandes in Perspektivansichten, Blick von Nordwesten. Oben links: Aus dem MOLA-DGM interpolierte Startwerte der ersten Facettierungsstufe. Oben rechts: Ergebnis der ersten Iteration. Unten links: DGM nach der zweiten Facettierungsstufe. Unten rechts: Endergebnis. Zahlenangaben in [m].

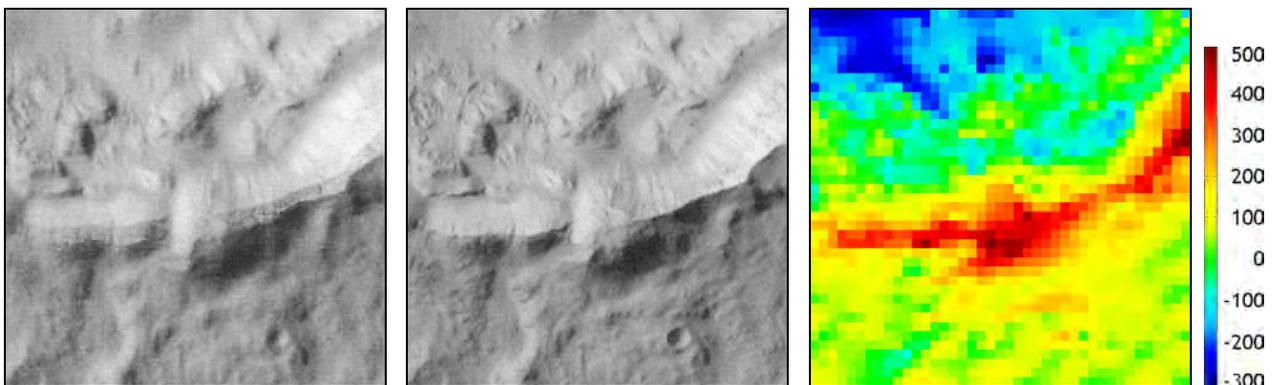


Abbildung 6.6, links: Auf dem MOLA-DGM basierendes Mittelbild der Pseudo-Orthobilder der beiden Stereokanäle. Mitte: Endgültiges Orthobild. Rechts: Höhendifferenzen in [m] zwischen dem endgültigen und dem MOLA-DGM.

Anhand der in Abbildung 6.7 dargestellten Entwicklung der Korrelationskoeffizienten kann die mit der DGM-Verbesserung einhergehende Annäherung der einzelnen Pseudo-Orthobilder quantifiziert werden. In diesem Beispiel sind die Startwerte aufgrund des im MOLA-DGM nicht erfassten Kraterandes vergleichsweise gering. Typische Anfangswerte liegen zwischen 90% und 95%. Die Korrelationskoeffizienten steigen dann für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gebiete auf etwa 98-99% an – für den Kraterand sind es 98,1% zwischen den äußeren Stereokanälen, was in der Regel dem niedrigsten Koeffizienten der HRSC-Kanäle entspricht. Der Wert liegt deutlich über der Fehlerschranke 90% (vgl. Abschnitt 5.5.1.1) und unterstreicht die Qualität des in Abbildung 6.6, Mitte, dargestellten endgültigen Orthobildes. In Bezug auf den regularisierten Ansatz sei angemerkt, dass sich die Korrelationskoeffizienten bei feiner Facettierung gegenüber der vorherigen Stufe auch (leicht) verschlechtern können. Das liegt daran, dass die Bildzuordnung Unterschiede zwischen den Pseudo-Orthobildern durch Höhenänderungen minimiert, während Glattheitsbedingungen dem entgegenwirken. Wie nachfolgend gezeigt, erhöht sich die Gewichtung dieser Bedingungen mit abnehmender Facettengröße.

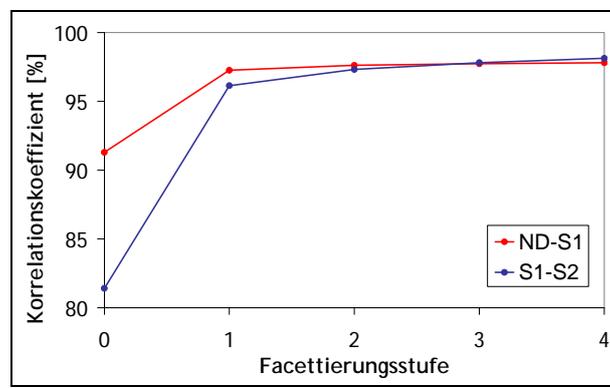


Abbildung 6.7: Korrelationskoeffizienten zwischen den Pseudo-Orthobildern während der Verfeinerung der geometrischen Modellierung. Die ersten Werte („Facettierungsstufe 0“) entsprechen den auf dem MOLA-DGM basierenden (Start-)Bildern.

6.2.3.3 Analyse der Ausgleichsstatistik

Der Verlauf der Korrelationskoeffizienten zeigt, dass sie als Abbruchkriterium der Iterationen der einzelnen Bearbeitungsschritte sowie schließlich auch der gesamten Berechnung dienen können (siehe SCHNEIDER 1991). Im Rahmen dieser Arbeit wird allerdings die gewichtete Summe der Verbesserungen $v^T P v$ verwendet: Wenn sie nicht mehr signifikant sinkt oder aufgrund der Regularisierung sogar ansteigt, wird die Berechnung abgebrochen und $v^T P v$ als Restrauschen interpretiert.

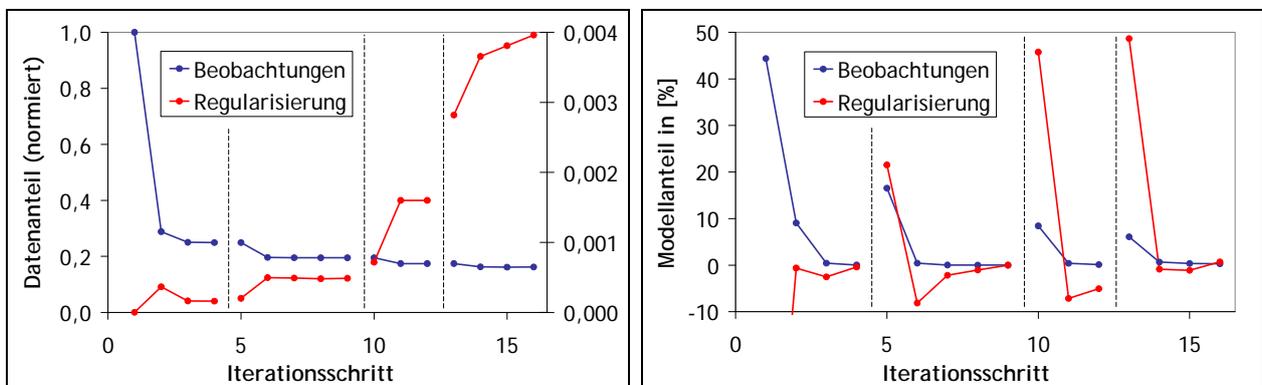


Abbildung 6.8, links: Verlauf des Datenanteils – Bilddaten (linke Skala) und Regularisierungsbedingungen (rechte Skala) – über die einzelnen Iterationen, normiert auf den ersten Iterationsschritt. Rechts: Verlauf der Modellanteile relativ zum jeweiligen Datenanteil. Die ersten Werte („Facettierungsstufe 0“) entsprechen den auf MOLA basierenden (Start-)Werten; die senkrechten, gestrichelten Linien kennzeichnen Übergänge zwischen den Facettierungsstufen.

Nach Gleichung (4.10) ergibt sich das Restrauschen als Differenz aus Information (Datenanteil) I^{PI} und Modellanteil $x^{\text{T}}A^{\text{T}}PI$. Da Facetten-Stereosehen nicht nur das Modell iterativ verbessert sondern auch von sich ändernden (Pseudo-)Beobachtungen ausgeht, soll der Verlauf von Daten- und Modellanteil über die einzelnen Facettierungsschritte und Iterationen analysiert werden, getrennt betrachtet für Bilddaten (Bildzuordnung) und Regularisierung. Die relative Gewichtung zwischen beiden erfolgt automatisch anhand der Varianzkomponenten.

In Abbildung 6.8, links, ist der Datenanteil dargestellt, aufgegliedert nach Bilddaten und Regularisierung und auf die erste Iteration der ersten Facettierungsstufe normiert (= 1).⁴¹ Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten, die das bisher Gesagte untermauern:

- Die mit Abstand größte Veränderung erfolgt in der ersten Iteration, in welcher sich der Krater rand heraushebt.
- Der Datenanteil verringert sich sowohl pro Facettierungsstufe – weshalb die nächstfeinere Stufe nötig wird – als auch insgesamt. In der vierten Stufe treten kaum noch Veränderungen auf, was ein Indiz dafür ist, dass hier die maximale Auflösung erreicht ist; der Datenanteil konvergiert gegen das Restrauschen.
- Der Anteil der Regularisierung ist generell kleiner, weil deutlich mehr Beobachtungen als Regularisierungsbedingungen vorliegen. Allerdings nimmt der Anteil letzterer zu, da sich die Anzahl der Bedingungen mit der DGM-Auflösung erhöht. Im ersten Iterationsschritt jeder Facettierung passt sich die Regularisierung an den größeren Freiheitsgrad an. Danach bleibt ihr Anteil in der jeweiligen Facettierungsstufe (nahezu) konstant.⁴²

Die auf den jeweiligen Datenanteil bezogenen Modellanteile sind in Abbildung 6.8, rechts, gezeigt. Aus diesen Verläufen kann Folgendes geschlossen werden:

- Der auf den Bilddaten basierende Modellanteil (Bildzuordnung) konvergiert während der Iterationen gegen 0, was bedeutet, dass der Informationsgehalt der Daten ausgeschöpft und eine weitere Modellverbesserung nicht möglich ist. Diese wird erst durch Verfeinerung der DGM-Auflösung ermöglicht.
- Die erste Iteration einer feineren Facettierung erlaubt Modellverbesserungen sowohl durch die Bildzuordnung als auch aus der Regularisierung. Ab der folgenden Iteration allerdings verschlechtert sich die Regularisierung (negative Anteile) zugunsten der Modellverfeinerung auf Basis echter Bildinformation.⁴³ Dieser Effekt ist in der letzten Facettierungsstufe nur noch marginal, was wiederum die gewählte kleinste DGM-Facettierung von 4×4 Orthobildsurfeln bestätigt.

6.2.4 Genauigkeit der Bilddaten

Zum Abschluss dieses Abschnitts werden die Annahmen der a-priori-Standardabweichung von 1 DN-Wert – anhand des Faktors für den Nadirkanal umgerechnet in den Reflexionsfaktor R – sowie die Gleichgewichtung aller Bilddaten überprüft.

⁴¹ Die Normierung bezieht sich auf den gesamten Datenanteil, wobei aufgrund des glatten MOLA-DGMs kaum von 0 abweichende Gleichungen für die erste Regularisierung vorliegen.

⁴² Der weitere Anstieg des Regularisierungsanteils innerhalb der feinsten Facettierungsstufe ist durch die Erhöhung der Gewichte basierend auf der Varianzkomponentenschätzung begründet. Dieses Phänomen wird im Abschnitt 6.4.2 diskutiert.

⁴³ Dies gilt analog für die erste Iteration der ersten Facettierungsstufe, der keine Auflösungsverfeinerung vorausging.

Tabelle 6.3: Vergleich von σ_0 a priori und σ_0 a posteriori.

	R_{σ_0}	DN_{σ_0}
σ_0 a priori	0,00130	1
σ_0 a posteriori	0,00166	1,28

Tabelle 6.4: Verhältnisse der Varianzkomponenten σ_i der Einzelbilder zur Standardabweichung σ_0 a posteriori.

Kanal	$R_{\sigma_i} / R_{\sigma_0}$	$DN_{\sigma_i} / DN_{\sigma_0}$
Nadir	1,03	0,95
Stereo 1	1,02	1,10
Stereo 2	0,94	0,95

Der Vergleich von σ_0 a priori und σ_0 a posteriori in Tabelle 6.3 bestätigt die im Abschnitt 2.2.3.3 abgeschätzte radiometrische Genauigkeit der panchromatischen HRSC-Kanäle, d.h. das Signal-Rausch-Verhältnis von > 100 . Des Weiteren sind die Varianzkomponenten für die Kanäle etwa gleich, sowohl in R als auch in den individuell umgerechneten DN-Werten. Sie zeigen insbesondere keine stereowinkel- oder auflösungsabhängigen Systematiken, vgl.

Tabelle 6.4.

6.3 Talkomplex: Vergleich der Berechnungsverfahren

Die im Kapitel 4 vorgestellten und entwickelten vier Verfahren zur Oberflächenmodellierung werden für einen Abschnitt der *Nanedi Valles* verglichen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Geometrie, für die Vergleichsdaten aus dem *HRSC DTM Test* vorliegen. Die radiometrischen Parameter werden bei der gemeinsamen Modellierung mitbestimmt, können aber nur auf ihre Plausibilität geprüft werden.

6.3.1 Bearbeitungsgebiet und HRSC-Daten

Das Bearbeitungsgebiet ist ein 5,6 km x 5,6 km großer Ausschnitt aus dem Talkomplex der *Nanedi Valles* bei 312,5° Ost und 6,8° Nord. Für die Auswertung werden alle fünf panchromatischen HRSC-Kanäle aus dem *Mars-Express*-Orbit 894 verwendet (Tabelle 6.5).

Tabelle 6.5: Orbit 894, Beobachtungsgeometrie für die *Nanedi Valles*.

Kanal	Auflösung	Bestrahlungswinkel θ_i		Beobachtungswinkel θ_r		Phasenwinkel α	
		Niveau	Facetten	Niveau	Facetten	Niveau	Facetten
Stereo 1	40,8 m	69,9°	42,7° – 90,0°	21,8°	0,0° – 48,5°	65,6°	65,3° – 65,9°
Photo 1	79,5 m	70,0°	42,8° – 90,0°	14,7°	0,0° – 41,3°	67,9°	67,6° – 68,3°
Nadir	18,9 m	70,1°	42,9° – 90,0°	3,6°	0,0° – 35,6°	73,5°	73,2° – 73,8°
Photo 2	71,5 m	70,2°	43,0° – 90,0°	15,2°	0,0° – 47,4°	79,9°	79,6° – 80,2°
Stereo 2	34,8 m	70,2°	43,1° – 90,0°	22,1°	0,0° – 53,5°	83,3°	82,9° – 83,6°

6.3.2 Modellierungsansätze

Es werden alle vier vorgestellten Ansätze zur Oberflächenmodellierung verglichen: Facetten-Stereosehen; regularisierter, Photoklinometrie- und integrierter Ansatz. Ähnlich wie für den Kraterrand erfolgt die Berechnung in mehreren Stufen, in denen die DGM-Auflösung von anfangs 16×16 Orthobildsurfeln pro Facette schrittweise halbiert wird. Die endgültige Auflösung beträgt für das nicht regularisierte Facetten-Stereosehen 200 m, für die anderen Ansätze 100 m bzw. 2×2 Surfel. Da die Mars-Oberfläche im Bearbeitungsgebiet keine variierenden Materialeigenschaften erkennen lässt (Abbildung 6.14, links), werden die Reflexionsparameter im integrierten Ansatz bzw. für die Photoklinometrie nicht in Facetten bestimmt. Damit ergeben sich folgende Auflösungen für die Oberflächenmodelle:

- Orthobild: 50 m
- DGM: 100 m bzw. 200 m
- Materialparameter: 5 600 m

Bei dem aus dem integrierten Ansatz berechneten DGM zeigt sich eine höhenabhängige Systematik in den Differenzen zur MOLA-Referenz (Abbildung 6.9). Der Anstieg der Regressionsgeraden durch die Höhendifferenzen als Funktion der MOLA-Höhe ist $0,126 \pm 0,025$ und damit signifikant. Der Zahlenwert sagt aus, dass Höhenunterschiede im DGM um 12,6% zu gering ausfallen und somit das Tal etwa 50 m zu flach modelliert ist. Wie im Abschnitt 4.7 dargelegt, wird ein solcher Effekt durch zu klein berechnete Luftlichteinflüsse hervorgerufen. Und tatsächlich liegen die in der Ausgleichung mitbestimmten Parameter ΔR_A in allen Bildern unterhalb der jeweils geringsten Reflexionsfaktoren, obwohl Schattenbereiche vorliegen und sie den dortigen Werten entsprechen sollten.

Daher werden die Parameter ΔR_A aus Schatten entnommen und für eine erneute Oberflächenmodellierung nach dem integrierten Ansatz vorgegeben. Die Verteilung der Höhendifferenzen zwischen dem so bestimmten DGM und MOLA ist in Abbildung 6.9, rechts, dargestellt. Die Höhenabhängigkeit verschwindet, was durch den nicht mehr signifikanten Anstieg der Regressionsgeraden von $0,018 \pm 0,050$ belegt wird.

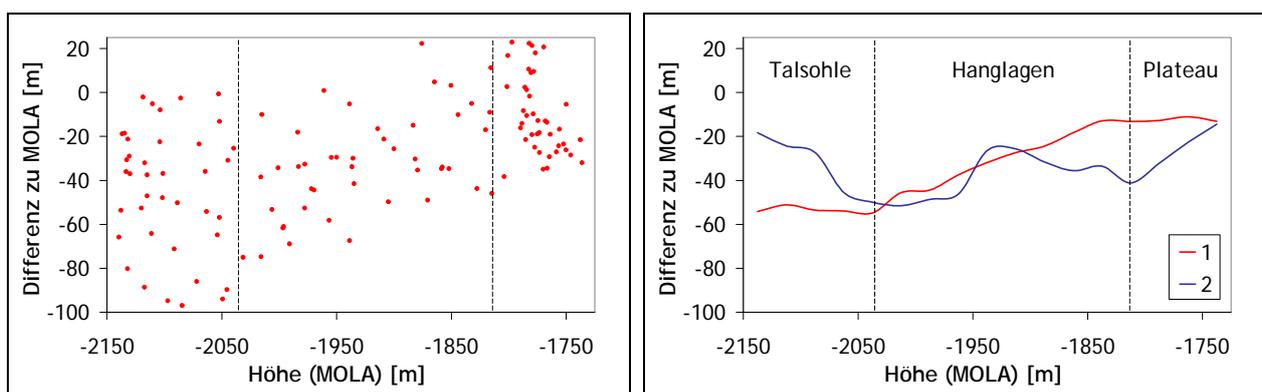


Abbildung 6.9: Höhenabhängigkeit der Differenzen zu MOLA. Links: Ergebnisse des integrierten Ansatzes für sämtliche MOLA-Spots. Rechts: Trendlinien (gleitende Mittel) für den integrierten Ansatz (1) und die Berechnung unter Vorgabe des Luftlichteinflusses (2).

In Abbildung 6.9 fällt auf, dass die Trendlinie der Verteilung der Höhendifferenzen nach Vorgabe der Luftlichtparameter größere Variationen zeigt als vorher. Bei der Interpretation sind zwei Dinge zu beachten: Einerseits treten diese Variationen zwischen Punkten gleicher Höhe auf, die über das Bearbeitungsgebiet verteilt sind, d.h. die Werte drücken keine Nachbarschaftsbeziehungen aus. Andererseits deutet sich dennoch an, dass die Oberflächenmodellierung ein komplexes Problem darstellt, bei dem viele Faktoren das Zusammenwirken von Bildzuordnung und Photoklinometrie und damit die Resultate beeinflussen. Die geometrischen und radiometrischen Ergebnisse aller Ansätze werden im Folgenden verglichen.

6.3.3 Geometrische Modelle

6.3.3.1 Facetten-Stereosehen

Am Beispiel des Talkomplexes mit teils sehr homogenen Bereichen lässt sich die Grenze des nicht regulierten Facetten-Stereosehens aufzeigen: Während es für kontrastreiche Gebiete gute Ergebnisse in Auflösungen bis etwa 4×4 Orthobildsurfel liefern kann, wenn das DGM nach jeder Iteration gefiltert wird (GEHRKE & HAASE 2006a, GEHRKE & BISCHOFF 2007), führt eine solche Vorgehensweise hier zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Die Filterung kann zwar das Rauschen reduzieren; das DGM weist aber sehr starke Ausreißer auf, wie Abbildung 6.10 verdeutlicht.

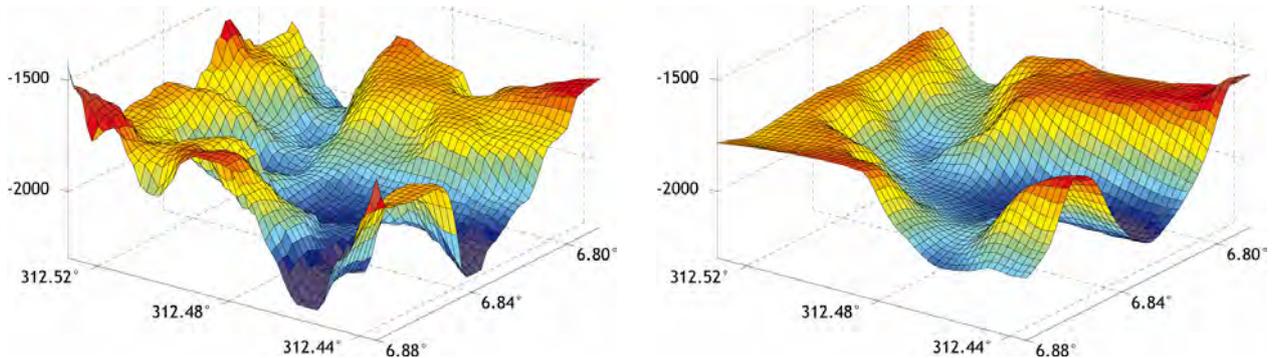


Abbildung 6.10: Gegenüberstellung der Perspektivansichten der DGMs aus Facetten-Stereosehen (links) und integriertem Ansatz unter Vorgabe der Luftlichtparameter (rechts). Beide DGMs wurden in sphärische Koordinaten mit derselben Lageauflösung transformiert. Blick von Nordwesten, Höhenangaben in [m].

Die in den Perspektivansichten klar erkennbaren Ausreißer können durch Vergleich mit MOLA-Höhen quantifiziert werden – siehe Tabelle 6.18 im Rahmen der Diskussion aller Ergebnisse. Es zeigt sich, dass hier eine Regularisierung des Facetten-Stereosehens notwendig wird.

6.3.3.2 Gegenüberstellung der weiterentwickelten Ansätze

Um ihre Detailtreue zu beurteilen, sind die DGMs aus den weiterentwickelten, auf dem Facetten-Stereosehen aufbauenden Modellierungsverfahren in Abbildung 6.11 als schattierte Reliefs gegenübergestellt. Dabei wird einmal die Bestrahlungsgeometrie zum Zeitpunkt der Bildaufnahme – bei welcher die Photoklinometrie-Ergebnisse naturgemäß eine gute Übereinstimmung mit dem Orthobild (z.B. Abbildung 6.14, links) zeigen – sowie die Bestrahlung unter dazu senkrechtem Azimut angesetzt; vgl. diesbezügliche theoretische Überlegungen im Abschnitt 5.5.1.2.

In Bezug auf die einzelnen Verfahren kann Folgendes festgehalten werden:

- Mit dem **regulierten Ansatz** kann die Geländeform grundsätzlich modelliert werden. Feine Details sind im DGM jedoch nicht enthalten. An Bruchkanten zeigen sich Artefakte. Die ebenen Bereiche wirken aufgrund der Regularisierung zwar homogen, schwingen sich aber zum Rand hin auf. Da der Ansatz keine Photoklinometrie beinhaltet, ist in dem DGM auch kein richtungsabhängiger Einfluss erkennbar.
- Der auf Basis des Lambertschen Reflexionsmodells berechnete **Photoklinometrie-Ansatz** zeigt eine deutlich detailliertere Wiedergabe des Geländes. Während das original bestrahlte Relief den photoklinometrischen Teil der Modellierung exakt umkehrt und damit dem Orthobild sehr nahe kommt, wird der Richtungseinfluss im senkrecht bestrahlten Relief deutlich: Die Detailtreue schwindet (vgl. inneres Tal oder südlicher Krater) und in den Ebenen deutet sich eine Wellenform – Modellverbiegungen quer zur Bestrahlungsrichtung – an, am besten zu erkennen im Nordosten des Gebietes. Dieses DGM weist kleinere, zufällig verteilte Artefakte auf.

- Zwischen den beiden mit dem **integrierten Ansatz** berechneten DGMs sind nahezu keine lokalen Unterschiede zu erkennen. Allerdings erhöht die Vorgabe der Luftlichtparameter die Dynamik des Gebietes, d.h. sie verstärkt Neigungen und führt zu kontrastreicherem Reliefs. Weil der integrierte Ansatz das Lunar-Lambert-Gesetz und so auch die Beobachtungsrichtungen einbezieht, wird die Abhängigkeit von der Bestrahlungsrichtung gegenüber dem Photoklinometrie-Ansatz geringer. Im DGM sind die Ebenen homogen, morphologische Details wie das innere Tal und der Krater werden deutlicher. Die beschriebenen Artefakte verschwinden. Die Qualitätsunterschiede zwischen beiden Bestrahlungsrichtungen sind nur noch marginal.

Damit führt die theoretische Erweiterung und Verfeinerung des geometrischen und radiometrischen Modellierungsansatzes auch praktisch zu verbesserten Ergebnissen in Bezug auf die Detailwiedergabe, d.h. die relative Genauigkeit. Die absolute Genauigkeit kann durch Regularisierung oder die Integration der Photoklinometrie naturgemäß nicht verbessert werden.

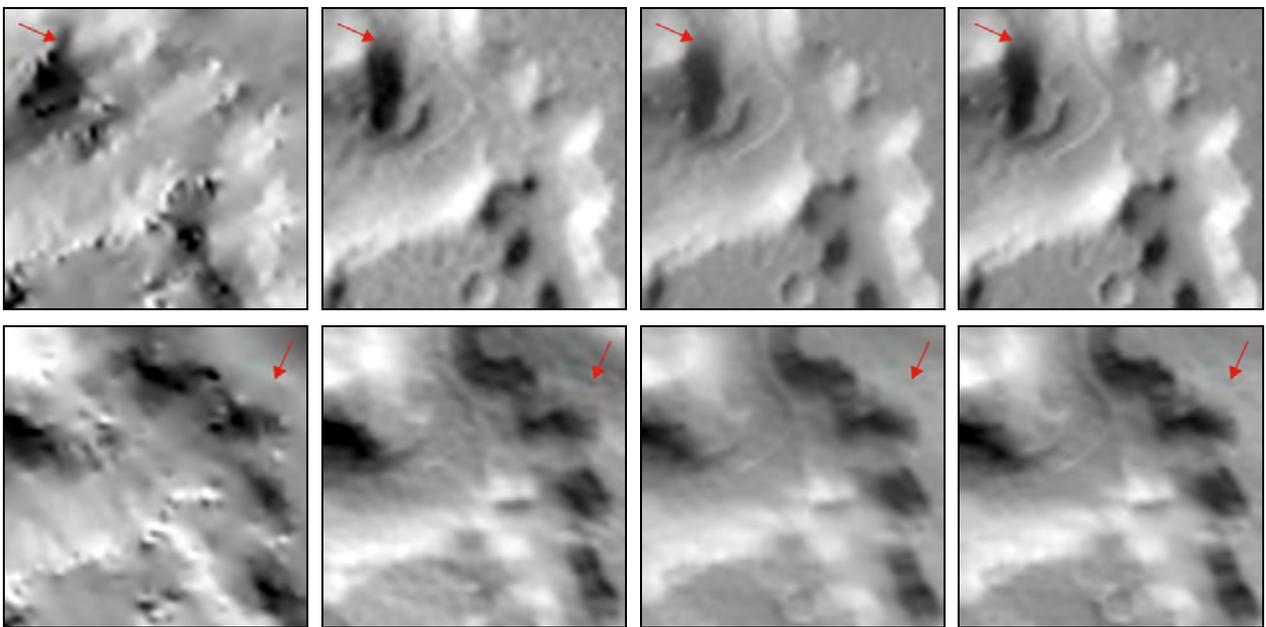


Abbildung 6.11: Schattierte Reliefs des *Nandedi Valles* Gebietes aus unterschiedlichen Modellierungsansätzen; oben: originale Bestrahlung, unten: Bestrahlung senkrecht dazu (gekennzeichnet durch Pfeile). Modellierungen v.l.n.r.: regulisierter Ansatz, Photoklinometrie-Ansatz, integrierter Ansatz und integrierter Ansatz unter Vorgabe des Luftlichteinflusses.

Die Ableitung von Höhenlinien aus den DGMs und ihre Überlagerung mit dem Orthobild bestätigen die obigen Feststellungen, vgl. Abbildung 6.12, oben. So sind in den Höhenlinien aus dem DGM des regulierten Ansatzes die nicht exakt wiedergegebenen Talkanten erkennbar, während sie beim integrierten Ansatz der Form im Bild klar folgen. Zwischen den beiden Ergebnissen zeigen sich im nordwestlichen Bereich Unterschiede in der absoluten Höhe von mehr als 100 m. Dies kann sowohl aus Glattheitsbedingungen folgen, die Modellverbiegungen insbesondere in den Ecken bewirken können (wie im Nordosten des Gebietes zu sehen), als auch aus Fehlern in der Photoklinometrie, möglicherweise durch den nahen Schattenbereich verursacht. Beide Effekte werden im Abschnitt 6.4 am Beispiel kleiner Einschlagkrater eingehend untersucht.

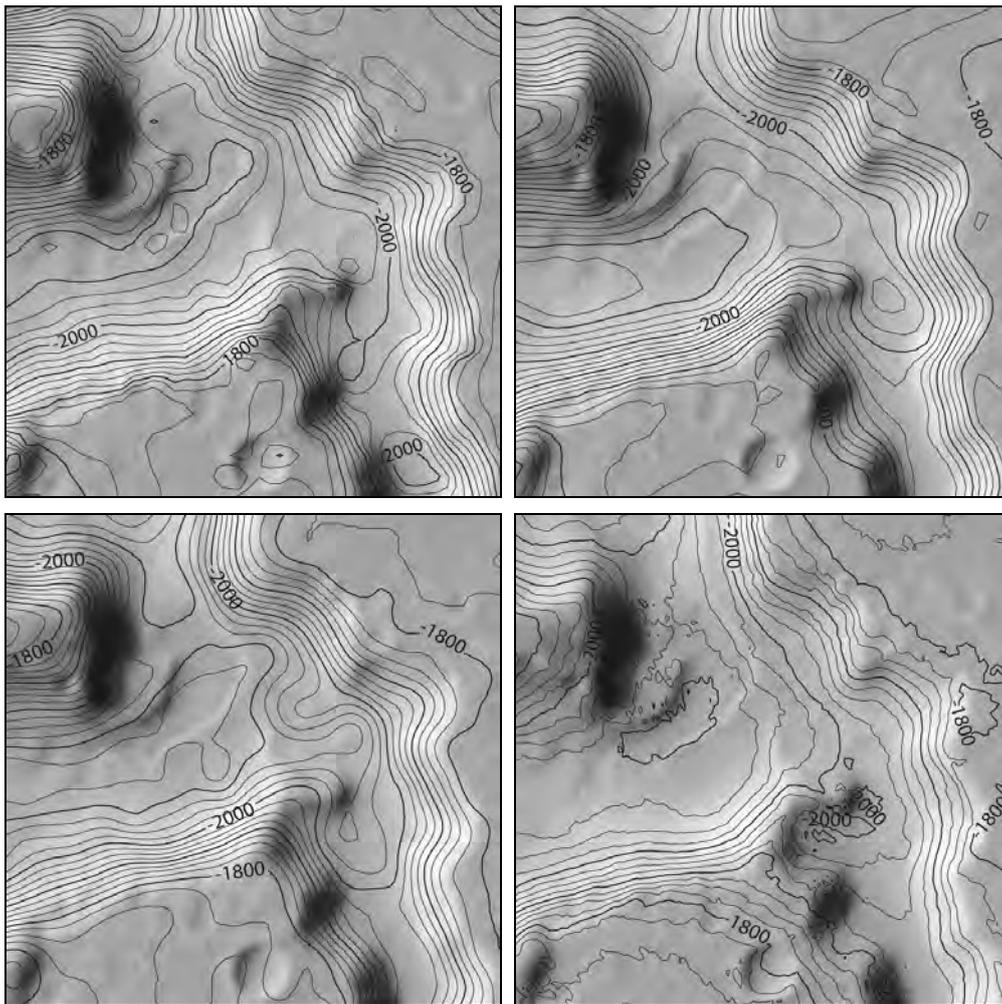


Abbildung 6.12: Überlagerung von Höhenlinien und Orthobildern. Oben links: regularisierter Ansatz; oben rechts: integrierter Ansatz unter Vorgabe der Luftlichtparameter. Unten links: Vergleichsdaten von *DLR-Gwinner* (Bildzuordnung); unten rechts: *DLR-Scholten/UniBwM* (Photoklinometrie).

Im Vergleich mit den Ergebnissen des *HRSC DTM Tests* (Abbildung 6.12 unten) zeigen sich ähnliche Charakteristiken zwischen den auf Bildzuordnung basierenden DGMs aus integriertem Ansatz und *DLR-Gwinner*. Die nominell bessere Lageauflösung – 50 m im Vergleich zu 100 m – führt dabei nicht zu mehr Detailgehalt. Wie schon beim Krater wirken die Höhenlinienverläufe aus *DLR-Gwinner* glatter als aus dem (regularisierten) Facetten-Stereosehen. Das mit gleicher Lageauflösung berechnete, auf Photoklinometrie basierende DGM *DLR-Scholten/UniBwM* enthält mehr morphologische Details und wirkt auch feiner als das aus dem integrierten Ansatz abgeleitete Modell.⁴⁴ Im Vergleich zu allen anderen DGMs fällt allerdings auf, dass insbesondere der südliche Talrand in *DLR-Scholten/UniBwM* nicht plausibel wiedergegeben ist, was auf Fehler in den dort verwendeten radiometrischen Parametern hindeutet. Hier zeigt sich der Vorteil der Verknüpfung von Bildzuordnung und Photoklinometrie im integrierten Ansatz.

⁴⁴ Dazu sei angemerkt, dass die für dieses Beispiel gewählte Orthobildauflösung von 50 m nicht dem maximal Möglichen entspricht sondern ein Kompromiss zwischen der Auflösung aller panchromatischen HRSC-Kanäle darstellt und auch die Größe des Bearbeitungsfensters, d.h. rechentechnische Aspekte, berücksichtigt. Im Abschnitt 6.4 (kleine Krater) wird die Orthobildauflösung mit 25 m und die DGM-Auflösung mit 2 x 2 Surfeln zu 50 m gewählt. Auch diese Ergebnisse werden mit dem *HRSC DTM Test* verglichen.

Die hier bestimmten DGMs liegen etwa 20 m bis 30 m höher als die im *Nanedi Valles* Gebiet gemessenen MOLA-Höhen (Tabelle 6.18). Da diese Abweichung nahezu unabhängig vom Ansatz auftritt, ist sie wahrscheinlich auf Systematiken in den Orientierungsdaten zurückzuführen. Die Differenzen in den einzelnen MOLA-Punkten sind in Abbildung 6.13 für den regularisierten und integrierten Ansatz dargestellt. Es zeigt sich der angesprochene Höhenunterschied im Nordwesten, wobei das DGM aus dem regularisierten Ansatz gut mit der MOLA-Referenz übereinstimmt und das Ergebnis des integrierten Ansatzes hier seine größten Abweichungen aufweist.

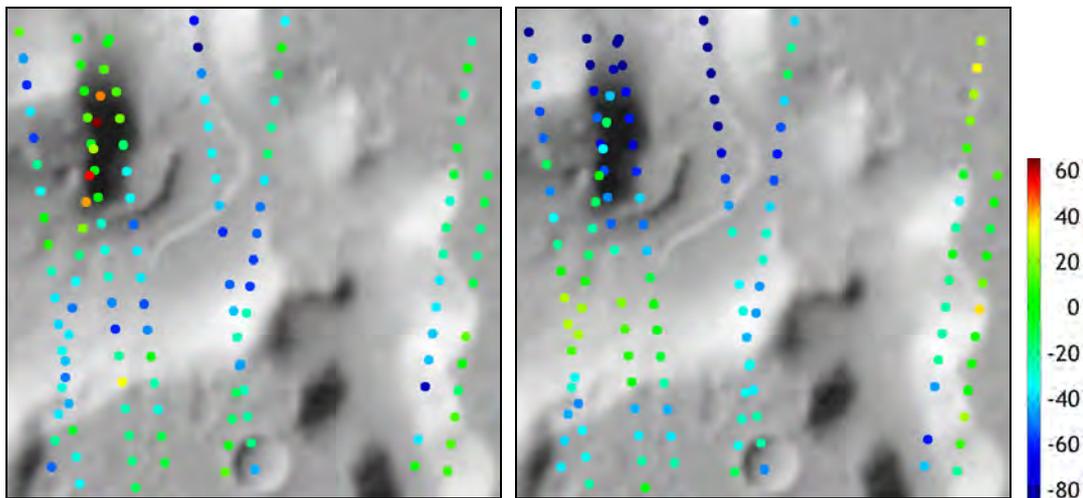


Abbildung 6.13: Höhendifferenzen zwischen MOLA und den hier abgeleiteten HRSC-DGMs. Links: regularisierter Ansatz; rechts: integrierter Ansatz unter Vorgabe der Luftlichtparameter. Zahlenangaben in [m].

Die Streuung der Höhenunterschiede im Bearbeitungsgebiet ist für die Regularisierung mittels Glattheitsbedingungen und unter Einbeziehung der Photoklinometrie ähnlich, vgl. Tabelle 6.18. Obwohl die Photoklinometrie die relative Genauigkeit und damit die Detailwiedergabe verbessert, kann sie die absolute Genauigkeit gegenüber der Bildzuordnung nicht steigern.

6.3.3.3 Genauigkeitsbetrachtung

Wie aus der Beobachtungsgleichung (4.26) ersichtlich, hängt die Höhengenaugkeit der aus einer Ausgleichung nach dem Facetten-Stereosehen resultierenden DGMs direkt von den Gradienten des Orthobildes ab (vgl. auch diesbezügliche Überlegungen im Abschnitt 4.6.3). Daher sind das Orthobild sowie dessen Gradienten in X und Y in Abbildung 6.14 wiedergegeben.

Seitens des Modellierungsansatzes wird die innere Genauigkeit des DGMs durch zwei Aspekte beeinflusst:

1. Die Standardabweichungen der Einzelhöhen sind von der **Facettengröße des DGMs** abhängig.
2. Eine **Regularisierung** – Glattheitsbedingungen und/oder Verknüpfung mit Photoklinometrie – bringt zusätzliche Beobachtungen, welche
 - a. die lokale Genauigkeit steigern und
 - b. die Standardabweichungen signifikant verkleinern.

Der erste Zusammenhang ist für unterschiedliche, mit dem Grundansatz des Facetten-Stereosehens berechnete Beispiele in GEHRKE & HAASE (2006a, 2006b) dokumentiert. So führt beispielsweise eine Halbierung der Facettengröße bei der sukzessiven Modellverfeinerung dazu, dass sich die Zahl der Orthobildsürfeln pro Facette und damit die Anzahl der Beobachtungen, die eine unbekannte Höhe bestimmen, verdoppelt. Dies wiederum bedeutet (im Durchschnitt) eine Verdoppelung der Standardabweichungen der

Einzelhöhen. Anschaulich formuliert: Eine geringere DGM-Auflösung verstärkt das Rauschen, welches sich in entsprechend höheren Standardabweichungen widerspiegelt.

Dies ändert sich mit der Regularisierung, da die relative Genauigkeit gesteigert und damit das Rauschen gemindert wird. Außerdem zeigen die aus der gemeinsamen Ausgleichung resultierenden Standardabweichungen nicht mehr die beschriebene Abhängigkeit von der Facettengröße und werden mit der Verringerung der Lageauflösung tendenziell sogar kleiner, insbesondere für die Photoklinometrie. Mit dem Ziel der Interpretation dieser Ausgleichungsstatistik hinsichtlich der DGM-Genauigkeit werden in Abbildung 6.15 die lokalen Verteilungen der Standardabweichungen aus Facetten-Stereosehen⁴⁵, regulisiertem Ansatz und integriertem Ansatz verglichen. Die Größenordnung ist zwischen den Verfahren stark unterschiedlich, die RMS der Standardabweichungen betragen 143,2 m, 14,1 m bzw. 0,7 m.

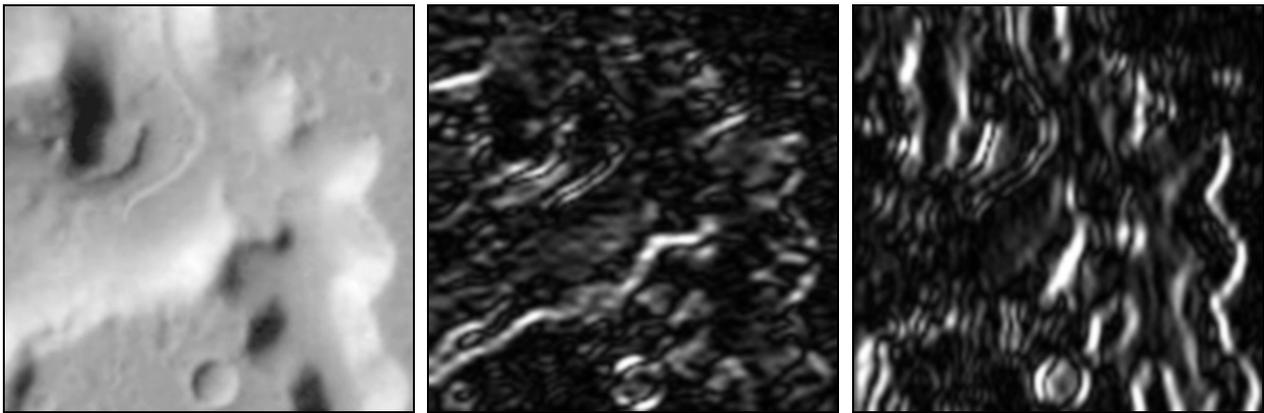


Abbildung 6.14, links: Orthobild aus dem regulierten Ansatz. Mitte: Beträge der Gradienten des Orthobildes in X. Rechts: Beträge der Gradienten des Orthobildes in Y.

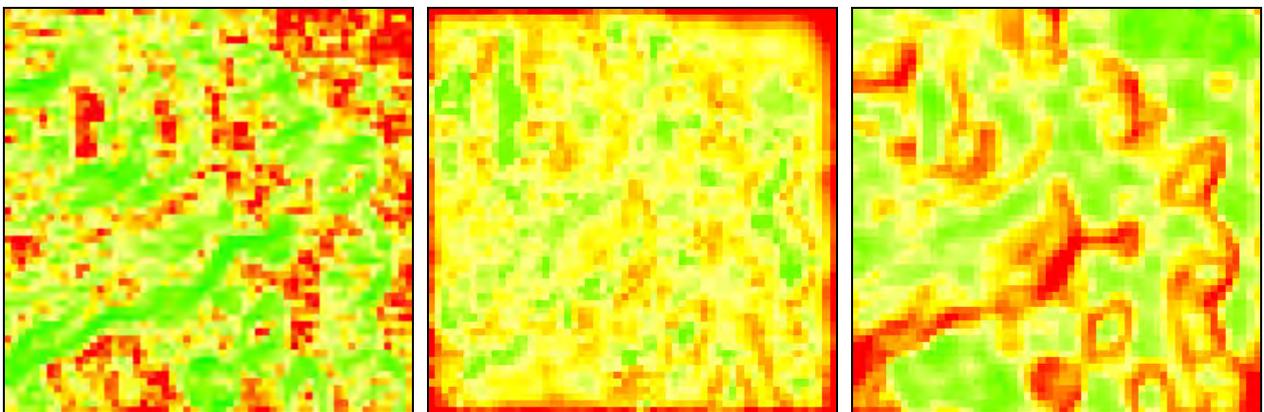


Abbildung 6.15: Standardabweichungen der Einzelhöhen, Farbverläufe von grün (klein) über gelb nach rot (groß). Links: Facetten-Stereosehen ohne Zusatzbedingungen. Mitte: regulierter Ansatz. Rechts: integrierter Ansatz unter Vorgabe der Luftlichtparameter. Da sich die Fehlerwerte zwischen den einzelnen Berechnungen stark unterscheiden, sind die Farbverläufe entsprechend angepasst, sodass die für den jeweiligen Ansatz charakteristische Verteilung herausgestellt wird.

Für alle Ansätze zeigen sich mehr oder weniger starke Randeffekte: Am Rand und insbesondere in den Ecken nimmt die Genauigkeit aufgrund der dort geringeren Redundanz ab. Über das Bearbeitungsgebiet

⁴⁵ Diese Werte können in jedem Modellierungsansatz mitbestimmt werden: aus den grundlegenden Beobachtungsgleichungen, der entsprechenden Gruppenvarianz und Redundanz.

treten die im Orthobild und in den Gradienten erkennbaren charakteristischen Formen der *Nanedi Valles* heraus, wobei allerdings große Unterschiede zwischen den einzelnen Ansätzen vorliegen. In Bezug auf die drei dargestellten Ergebnisse lässt sich festhalten:

- Das **Facetten-Stereosehen** zeigt dort die geringsten Standardabweichungen, wo gute Kontraste herrschen und demzufolge die Bildzuordnung zuverlässige Ergebnisse liefert. Dies wird insbesondere im Vergleich mit den Gradientenbildern deutlich.
- Die **Regularisierung** durch Glattheitsbedingungen führt zu einer relativ homogenen Verteilung der Standardabweichungen, die aber an den Gebietsrändern stark zunehmen. Dies korrespondiert mit der Tendenz des DGMs zum Aufschwingen am Rand.
- Mit der Integration der **Photoklinometrie** kehrt sich die Genauigkeitsverteilung im Vergleich zur Bildzuordnung um: Das DGM wird in texturarmen Bereichen sehr gut stabilisiert. An Geländekanten, wo anhand der Gradienten die Photoklinometrie zugunsten der Bildzuordnung weniger stark gewichtet ist, nehmen die Standardabweichungen zu.

Die oben angegebenen RMS-Werte legen eine signifikante Genauigkeitssteigerung durch Regularisierung und besonders durch die Verknüpfung von Bildzuordnung und Photoklinometrie nahe. Demgegenüber ist im Rahmen dieser Arbeit sowohl theoretisch als auch praktisch nachgewiesen, dass eine Regularisierung (Glattheitsbedingungen oder Photoklinometrie) die absolute DGM-Genauigkeit nicht steigern kann. Diese hängt allein von der Bildzuordnung ab und muss demzufolge auch durch die daraus resultierenden Standardabweichungen quantifiziert werden (Abbildung 6.15, links), und zwar auf diejenige DGM-Lageauflösung bezogen, bei der der Informationsgehalt der Bilddaten durch die Bildzuordnung ausgeschöpft ist.⁴⁶ Die Auflösungsgrenze ist von vielen Faktoren abhängig und liegt für das Facetten-Stereosehen im Bereich von 4 x 4 bis 10 x 10 Orthobildsurfeln (WEISENSEE 1992, ANDERSSOHN 2004, GEHRKE & HAASE 2006a). Als Indikatoren können die Entwicklung der Daten- und Modellanteile (vgl. Abschnitt 6.2.3.3), das Regularisierungsgewicht (siehe Abschnitt 6.4.2 zur Dominanz der Regularisierung) oder auch die Korrelationskoeffizienten der Pseudo-Orthobilder (Abschnitt 6.2.3.2) dienen. Beispielsweise zeigen letztere im Bereich der *Nanedi Valles* keine Verbesserungen für Facettengrößen unter 8 x 8 Surfeln. Für diese signifikante Auflösung beträgt der RMS der Standardabweichungen der DGM-Höhen ohne Regularisierungseinfluss 35,8 m. Diese innere Genauigkeit wird durch die Streuung der Höhendifferenzen zu MOLA bestätigt. Auch für den im Abschnitt 6.2.3 analysierten Kraterrand stimmen die entsprechenden Werte gut überein (Tabelle 6.6).

Tabelle 6.6: Gegenüberstellung der anhand der signifikanten Auflösung bestimmten Standardabweichungen σ und der Höhendifferenzen Δh zu MOLA-Punkten (siehe auch Tabelle 6.18).

Gebiet	Ansatz	Auflösung [Surfel]	RMS σ [m]	RMSE Δh [m]
Talkomplex	Regularisierung	8 x 8	35,8	25,9
	Photoklinometrie			39,6
	Integrierter Ansatz			32,1
Kraterrand	Regularisierung	4 x 4	42,3	37,5

⁴⁶ Bei einer korrekt ausgeführten Regularisierung sollte diese absolute Genauigkeit bei weiterer Verringerung der Facettengröße (in etwa) bestehen bleiben.

Lokale DGM-Verfeinerungen bei weiterer Verringerung der DGM-Auflösung gehen einher mit durch die regularisierte bzw. integrierte Ausgleichung verringerten Standardabweichungen. Auch der signifikante Unterschied zwischen regularisiertem und integriertem Ansatz (RMS: 14,1 m bzw. 0,7 m) korrespondiert mit einer deutlichen Verbesserung der lokalen Genauigkeit, vgl. Abbildung 6.11. Dies legt nahe, die entsprechenden Standardabweichungen als relatives Genauigkeitsmaß, d.h. als Genauigkeit von Neigungen, zu betrachten.

Aufgrund dieser Überlegungen ist es möglich, sowohl die absolute als auch die relative (innere) Höhen-genauigkeit jedes DGM-Punktes auf Basis des in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsansatzes abzuschätzen. Wie die Analysen in diesem Abschnitt sowie die Ergebnisse aus allen in der Arbeit untersuchten Gebieten zeigen, sollte dabei aber beachtet werden, dass die DGM-Höhen und damit auch deren (äußere) Genauigkeit von vielen Einflussfaktoren abhängen – vgl. Diskussion im Abschnitt 6.7.

6.3.4 Radiometrische Modellierung

Aus den unterschiedlichen Modellierungsansätzen liegen für das Gebiet der *Nanedi Valles* Reflexionsparameter des Lambert-, Lunar-Lambert- und Hapke-Modells vor.

6.3.4.1 Lambertsches Reflexionsmodell (Photoklinometrie-Ansatz)

Der für den Photoklinometrie-Ansatz nach Gleichung (4.34) benötigte Faktor wurde vorab mit $B = 0,288$ bestimmt. Er stellt eine aus Mars-Oberfläche und Atmosphäre kombinierte Lambertsche Albedo dar.

SODERBLOM et al. (2006a) haben Reflexionsmodelle für vergleichbare Regionen der Mars-Oberfläche aus Daten des *Hubble Space Teleskops* bestimmt (vgl. Abschnitt 5.5.3.3) – u.a. auch die Lambert-Albedo, ohne die Einflüsse von Oberflächen- und Atmosphärenstreuung zu trennen. Bei einer Wellenlänge von 673 nm (HRSC panchromatisch: 675 nm) ergaben sich dabei Werte von 0,32 (*Amazonis Planitia*) bzw. 0,34 (*Arabia Terra*). Die Ergebnisse sind zwar nicht unmittelbar vergleichbar, unterstreichen aber die Plausibilität des hier bestimmten Parameters.

6.3.4.2 Lunar-Lambert-Modell (integrierter Ansatz)

Das Lunar-Lambert-Modell ist Bestandteil des integrierten Ansatzes, bei dem hier einmal der Luftlichteinfluss mitbestimmt und einmal aus den Reflexionsfaktoren in Schattenbereichen vorgegeben ist.

Die Reflexionsparameter A_N und L sollten grundsätzlich phasenwinkelabhängig, d.h. pro HRSC-Kanal, bestimmt werden. In diesem Beispiel liegt dabei allerdings eine Überparametrisierung vor und die Ausgleichung konvergiert nicht, sodass nur eine Normalalbedo A_N und damit lediglich das Gewicht L individuell für die Kanäle abgeleitet werden.⁴⁷ Die Ergebnisse aus dem integrierten Ansatz sowie dem integrierten Ansatz unter Vorgabe der Luftlichtparameter ΔR_A sind in Tabelle 6.7 und Abbildung 6.16 wiedergegeben. Dabei zeigt sich der Zusammenhang zwischen Atmosphären- und Oberflächeneigenschaften: Änderungen von ΔR_A – im Mittel von etwa 0,069 (integrierter Ansatz) auf 0,076 (Vorgabe aus Schatten) erhöht – haben deutliche Auswirkungen auf A_N und L . Erwartungsgemäß führen größere ΔR_A zu einem etwa um denselben Betrag verringerten A_N .

⁴⁷ Bei Betrachtung von Abbildung 5.5 und insbesondere auch der Lunar-Lambert-Approximation des im folgenden Abschnitt bestimmten Hapke-Modells (vgl. Abbildung 6.16) wird deutlich, dass L eine stärkere Phasenwinkelabhängigkeit zeigt als A_N . Daher wird die beschriebene Parametrisierung gewählt.

Tabelle 6.7: Lunar-Lambert-Parameter im Gebiet der *Nanedi Valles*

Parameter	Phasenwinkel	Integrierter Ansatz	Vorgabe Luftlicht
A_N	65,6° – 83,3°	0,4094 ± 0,0002	0,3370 ± 0,0002
L	65,6°	0,4624 ± 0,0051	0,3360 ± 0,0031
	67,9°	0,3893 ± 0,0059	0,2388 ± 0,0035
	73,5°	0,3251 ± 0,0065	0,2147 ± 0,0036
	79,9°	0,3665 ± 0,0050	0,2634 ± 0,0034
	83,3°	0,3639 ± 0,0043	0,2720 ± 0,0032

Der phasenwinkelabhängige Verlauf des Gewichtsparameters L zeigt grundsätzlich die in Abbildung 5.5, rechts, dargestellte abnehmende Tendenz. Während die Lunar-Lambert-Approximation des im Folgenden abgeleiteten Hapke-Modells die Albedo A_N sehr gut anpasst, sind die Differenzen in L leicht höher als aufgrund der Genauigkeitsbetrachtung im Abschnitt 5.4, Abbildung 5.6, zu vermuten. Auch die Streuung der Werte legt nahe, dass die in der Tabelle angegebenen Standardabweichungen der einzelnen Parameter zu optimistisch sind. Allerdings sind in ihnen auch nicht die Fehler der atmosphärischen Korrektur enthalten (vgl. dazu Tabelle 6.19).

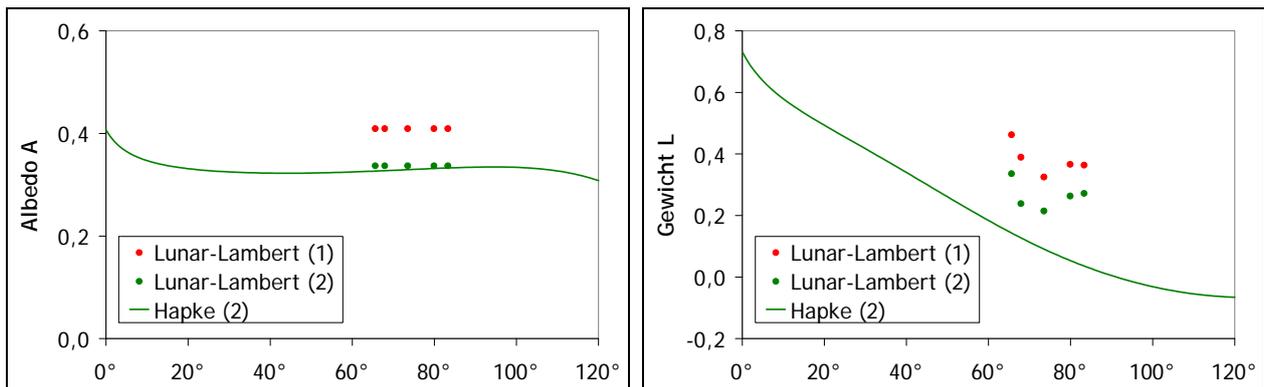


Abbildung 6.16: Lunar-Lambert-Parameter A_N (links) und L (rechts) in Abhängigkeit vom Phasenwinkel – Daten aus integriertem Ansatz (1), Vorgabe des Luftlichteinflusses (2) sowie der Approximation des Hapke-Modells.

6.3.4.3 Hapke-Modell

Die Hapke-Modellierung basiert auf den Ergebnissen des integrierten Ansatzes unter Vorgabe des Luftlichteinflusses. Als Startwerte der Ausgleichung dienen diejenigen Hapke-Parameter, deren Lunar-Lambert-Approximation sich etwa an die ermittelten Werte anpasst: Teilchenalbedo $w = 0,85$, makroskopische Rauigkeit $\bar{\theta} = 10^\circ$, Formparameter $b = 0,2$ und Gewicht $c = 0,5$ der Double-Henyey-Greenstein-Phasenfunktion (in Abbildung 6.16 nicht dargestellt). Während der Ausgleichung des Vier-Parameter-Modells konvergiert b gegen 0, was c unbestimmt werden lässt, siehe Gleichung (3.34). Daher sind nur die drei Parameter w , $\bar{\theta}$ und b bestimmbar und es wird $c = 1$ gesetzt. Die Ergebnisse können der Tabelle 6.8 entnommen werden.

Da für diese Region keine direkten Vergleichsdaten vorliegen, sind zur generellen Einordnung wiederum von SODERBLUM et al. (2006a) ermittelte Werte für *Amazonis Planitia* und *Arabia Terra* angegeben; aufgrund des Fehlens größerer Phasenwinkel wurde dabei allerdings nicht die makroskopische Rauigkeit $\bar{\theta}$ mitbestimmt.

Tabelle 6.8: Hapke-Parameter im Gebiet der *Nanedi Valles* und Vergleichswerte von SODERBLOM et al. (2006a).

Parameter	<i>Nanedi Valles</i>	<i>Amazonis Pl.</i>	<i>Arabia Terra</i>
w	0,867 ± 0,001	0,84 ± 0,01	0,82 ± 0,06
b	0,012 ± 0,001	0,082 ± 0,01	0,092 ± 0,03
$\bar{\theta}$ [°]	22,0 ± 0,2		

Die hier ermittelten Materialparameter lassen darauf schließen, dass der modellierte Abschnitt der *Nanedi Valles* von hellem Oberflächenmaterial mit großer Teilchenalbedo w bedeckt ist, welches eine breite, nahezu phasenwinkelunabhängige (Rück-)Streuung zeigt ($b \rightarrow 0$, $c = 1$). Die makroskopische Rauigkeit liegt in einem für die Mars-Oberfläche mittleren Bereich – vgl. JOHNSON et al. (2008). Die aus der Ausgleichung resultierenden Standardabweichungen der Hapke-Parameter erscheinen, wie schon beim Lunar-Lambert-Modell, zu optimistisch.

6.3.5 Genauigkeit und Redundanzanteile der Bilddaten

Für die *Nanedi Valles*, wo die Modellierung auf allen panchromatischen HRSC-Kanälen basiert, soll die Annahme der a-priori-Standardabweichung von 1 DN-Wert, gleichgewichtet für alle fünf Kanäle, noch einmal überprüft werden. Die Ergebnisse aus dem regularisierten Ansatz sind in Tabelle 6.9 und Tabelle 6.10 zusammengefasst. Sie bestätigen die am Beispiel des Kraterrandes im Abschnitt 6.2.4 gewonnenen Erkenntnisse auch für die Photometriekanäle: Die radiometrische Genauigkeit der panchromatischen Kanäle der HRSC ist etwa 1 DN ($\text{SNR} > 100$), eine vom Stereowinkel und/oder der Auflösung abhängige Systematik liegt nicht vor.

Tabelle 6.9: Vergleich von $\sigma_{0 \text{ a priori}}$ und $\sigma_{0 \text{ a posteriori}}$.

	R_{σ_0}	DN_{σ_0}
$\sigma_{0 \text{ a priori}}$	0,00130	1
$\sigma_{0 \text{ a posteriori}}$	0,00151	1,16

Tabelle 6.10: Verhältnisse der Varianzkomponenten σ_i der Einzelbilder zur Standardabweichung $\sigma_{0 \text{ a posteriori}}$.

Kanal	$R_{\sigma_i} / R_{\sigma_0}$	$\text{DN}_{\sigma_i} / \text{DN}_{\sigma_0}$
Nadir	1,10	0,96
Stereo 1	0,98	1,00
Stereo 2	0,97	0,93
Photo 1	0,95	1,08
Photo 2	1,00	1,03

Die Redundanzanteile sowie die Beiträge der einzelnen Bilder und Glattheitsbedingungen zur DGM-Bestimmung aus dem regularisierten Ansatz sind in Tabelle 6.11 gegenübergestellt – für den Kraterrand und den *Nanedi Valles* Komplex, jeweils für die feinste Facettierung des DGMs. Beim Talkomplex sind dabei auch die Daten für diejenigen Bildbereiche mit den größten Gradienten (5% der Gesamtfläche) angegeben.

Tabelle 6.11: Durchschnittliche Redundanzanteile r und Anteile u an der Bestimmung der unbekanntes DGM-Höhen für die einzelnen Beobachtungsgruppen (HRSC-Kanäle bzw. Regularisierungsbedingungen).

Gruppe	Kraterrand		Talkomplex		Talkomplex, 5% Grad.	
	r_i	Σu_i [%]	r_i	Σu_i [%]	r_i	Σu_i [%]
Nadir	0,999	1,1	0,999	0,2	0,996	1,6
Stereo 1	0,985	23,5	0,987	5,1	0,946	21,3
Stereo 2	0,987	20,9	0,991	3,5	0,947	20,8
Photo 1			0,997	1,1	0,989	4,4
Photo 2			0,995	1,7	0,972	11,0
Bedingungen	0,714	54,5	0,542	88,4	0,848	40,9

Aus den in Tabelle 6.11 angegebenen Ausgleichungsstatistiken lassen sich folgende Systematiken herausstellen:

- Die Redundanzanteile der Bilddaten sind sehr hoch, was in der grundsätzlich hohen Gesamtredundanz beim Facetten-Stereosehen begründet ist.
- Die durchschnittlichen Redundanzanteile nehmen mit dem Stereowinkel ab, und damit wird der Anteil der jeweiligen Bilder an der DGM-Bestimmung größer. Den geringsten Beitrag zur Modellierung leisten die Bilddaten des Nadirkkanals, da sie kaum Parallaxen enthalten. Dennoch ist dieser zwischen den Stereo- und Photometrikanälen liegende Kanal besonders für die Bildzuordnung zu Beginn der sukzessiven DGM-Verfeinerung unabdingbar.
- Der Anteil der Regularisierung an der Bestimmung der Unbekannten ist hoch, insbesondere für den Talkomplex, der zum einen mit einer feineren Facettierung als der Kraterrand berechnet ist und zum anderen geringere Texturen aufweist. Bei der Beschränkung auf die kontrastreichen Bildbereiche ergibt sich eine ähnliche Statistik wie beim Krater.

Es ist denkbar, dass die Analyse der Redundanzanteile zur Optimierung der Ausgleichung dienen kann. Ähnlich wie bei einer geodätischen Netzoptimierung könnten hier Beobachtungsgleichungen für die Bilddaten oder auch Glattheitsbedingungen mit sehr großen Redundanzanteilen weggelassen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese theoretische Möglichkeit jedoch nicht weiter verfolgt.

6.4 Kleine Krater: Herausforderung an die DGM-Berechnung

Eine Möglichkeit zur Beurteilung der DGM-Qualität ist die Erkennbarkeit morphologischer Details. Im *HRSC DTM Test* wurde untersucht, wieviele der aus Bilddaten ausgewählten Einschlagkrater auch in schattierten Reliefs identifizierbar sind. Wie zu erwarten, nimmt dabei die Erkennbarkeit mit der Kratergröße zu. Dass diese für Krater unter 1 km Durchmesser bei den auf Bildzuordnung basierenden DGMs bei weniger als 10% liegt und auch mittels Shape-from-Shading auf nur 20-50% steigt (HEIPKE et al. 2007), unterstreicht, dass die Modellierung derartiger Detailformen eine wirkliche Herausforderung an die DGM-Berechnung darstellt.

In diesem Zusammenhang sind besonders diejenigen Bereiche der Kraterränder zu beachten, die etwa in Richtung des Bestrahlungszazimuts verlaufen. Weil Neigungsänderungen senkrecht dazu auftreten, zeigen diese Randabschnitte kaum Kontraste und sind sowohl durch Bildzuordnung als auch durch Photoklinometrie schwer zu erfassen.

6.4.1 Bearbeitungsgebiet, HRSC-Daten und Vergleichs-DGMs

Das 2,8 km x 2,8 km große Bearbeitungsgebiet liegt bei 313,0° Ost und 5,5° Nord. Es umfasst zwei unbe-nannte Einschlagkrater mit Durchmessern von 725 m (südwestlicher Krater) bzw. 840 m (nordöstlicher Krater), vgl. Abbildung 6.17, links. Die Modellierung basiert auf den in Tabelle 6.12 angegebenen Daten des *Mars-Express*-Orbits 894.

Tabelle 6.12: Orbit 894, Beobachtungsgeometrie im Gebiet der zwei kleinen Krater.

Kanal	Auflösung	Bestrahlungswinkel θ_i		Beobachtungswinkel θ_r		Phasenwinkel α	
		Niveau	Facetten	Niveau	Facetten	Niveau	Facetten
Stereo 1	39,2 m	71,0°	38,0° - 90,0°	21,5°	0,0° - 48,0°	63,1°	62,9° - 63,3°
Nadir	18,2 m	71,2°	38,2° - 90,0°	0,6°	0,0° - 33,1°	70,8°	70,6° - 71,0°
Stereo 2	33,6 m	71,3°	38,4° - 90,0°	21,7°	0,0° - 49,0°	80,7°	80,6° - 80,9°

Um möglichst direkte Vergleiche mit den Ergebnissen des *HRSC DTM Tests* zu ermöglichen, wird die Berechnung mit dem regularisierten Ansatz sowie mit dem Photoklinometrie-Ansatz unter Verwendung des Lambertischen Reflexionsgesetzes (photometrisch identisch mit dem Shape-from-Shading von *DLR-Scholten/UniBwM*) durchgeführt. Die Lageauflösung für die DGMs ist wie bei den Vergleichsdaten 50 m. Das Orthobild wird hier mit 25 m/Surfel berechnet.

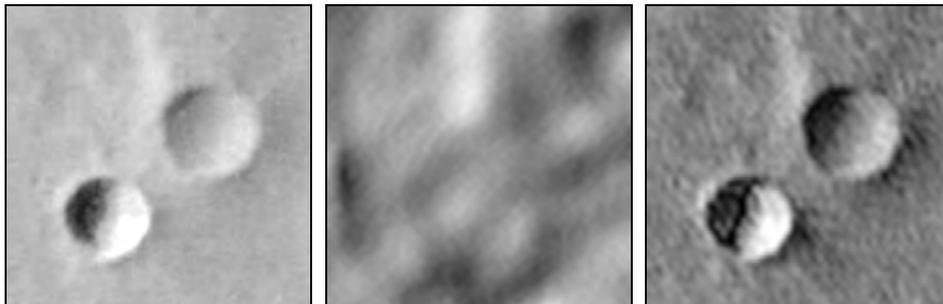


Abbildung 6.17: Orthobild (links) und schattierte Reliefs der DGMs *DLR-Gwinner* (mitte) sowie *DLR-Scholten/UniBwM* (rechts).

Bei der Betrachtung des analog zum Orthobild bestrahlten schattierten Reliefs des DGMs *DLR-Gwinner* (Abbildung 6.17, rechts) fällt auf, dass sich die Krater allenfalls andeuten – sie wären ohne den unmittelbaren Vergleich mit dem Orthobild gar nicht als solche identifizierbar. In dem auf Shape-from-Shading basierenden DGM, *DLR-Scholten/UniBwM*, hingegen sind beide Krater eindeutig erkennbar. Die Qualität der Modellierung von Kraterform und -tiefe in den einzelnen DGMs wird im Abschnitt 6.4.4 diskutiert.

6.4.2 Regularisierter Ansatz

Um eine Auflösung von 50 m zu erzielen, wird die Facettengröße des DGMs schrittweise von 16 x 16 auf 2 x 2 Surfel verringert. Wenn dabei die Gewichtung zwischen Bildzuordnung und Glattheitsbedingungen automatisch anhand der Varianzkomponentenschätzung erfolgt, dominiert – in dieser bis auf die Krater-ränder texturarmen Landschaft – letztendlich die Regularisierung. Die Auswirkungen einer solchen Berechnung auf das DGM illustriert Abbildung 6.18. Die Entwicklung der Gewichtsparameter über die Facettierungsstufen, normiert auf eine Facettengröße von 16 x 16 Surfeln, zeigt Abbildung 6.19. Eine Normierung wird vorgenommen, weil in den für die Regularisierung verwendeten Gleichungen (4.28) und (4.29) die Knickfreiheit des DGMs als Bedingung an die Höhen benachbarter Stützstellen formuliert ist,

welche allerdings während der sukzessiven Verringerung der Facettengröße zusammenrücken; die Basislänge verkleinert sich. Damit die Regularisierung dieselbe Wirkung hat, muss sie - als ausschließliche Bedingung an die Höhen, d.h. unabhängig von der horizontalen Basis - stärker gewichtet werden. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird dieser Effekt durch Normierung der Gewichte auf die angegebene Facettengröße herausgerechnet.

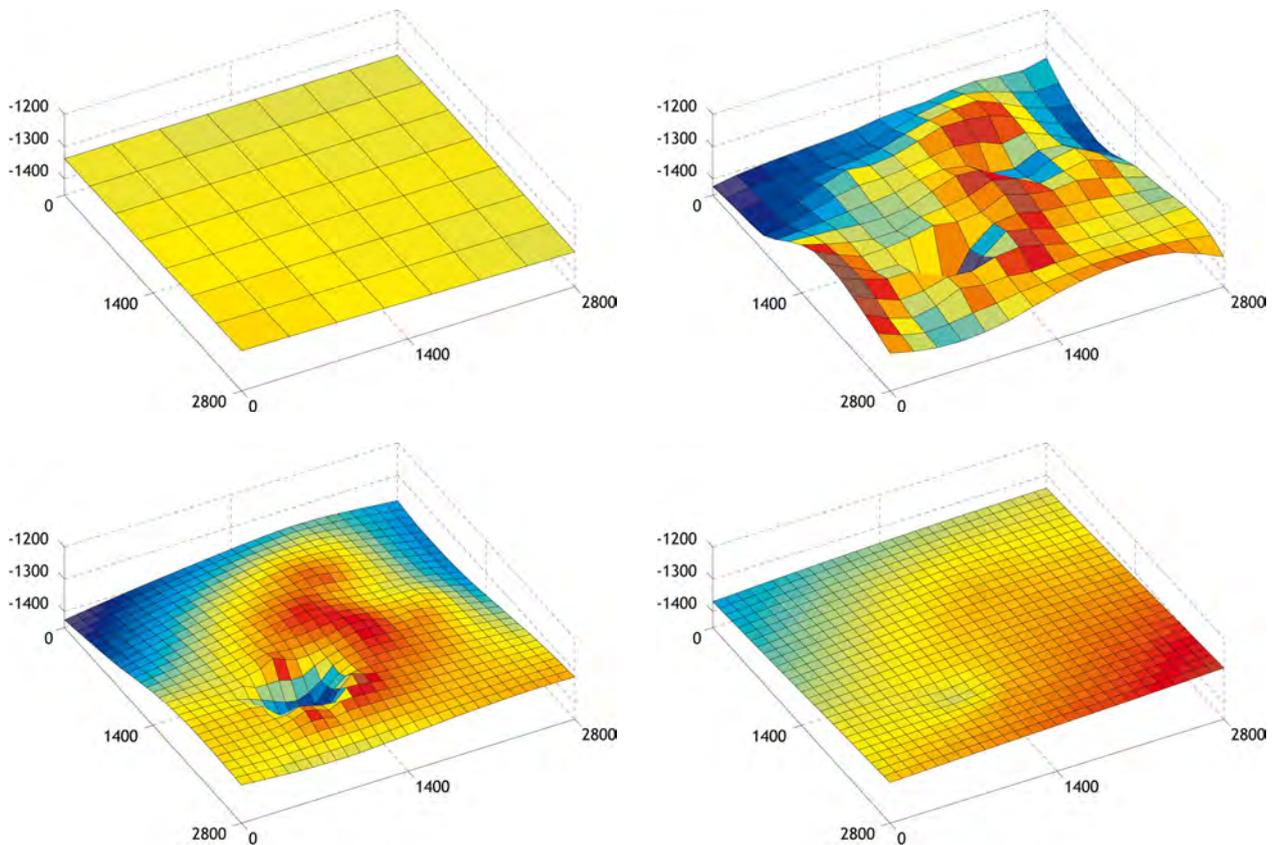


Abbildung 6.18: Sukzessive DGM-Veränderung der zwei Krater in Perspektivansichten; Blick von Südwesten. Oben links: Aus dem MOLA-DGM interpolierte Startwerte der ersten Facettierungsstufe. Oben rechts: DGM nach der zweiten Facettierungsstufe. Unten: Verebnung während der dritten Stufe am Beispiel der Iterationsschritte 10 und 30. Blick von Südwesten, Zahlenangaben in [m].

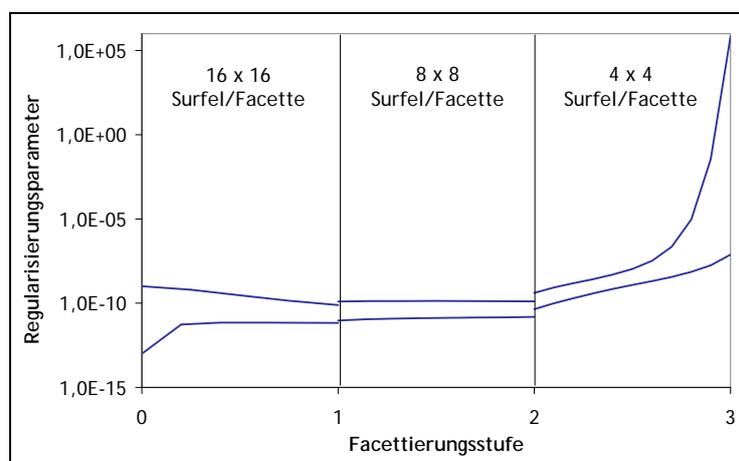


Abbildung 6.19: Entwicklung der Gewichtung der Regularisierung gegenüber der Bildzuordnung (normiert auf 16 x 16 Surfel) für unterschiedliche Startwerte während der geometrischen Modellverfeinerung.

Beide Abbildungen zeigen eine plausible Entwicklung des regularisierten Ansatzes bis zu einer DGM-Facettengröße von 8×8 Surfeln. In diesem DGM sind die beiden Krater eindeutig erkennbar, und der normierte Gewichtsparameter bleibt nach der Anpassung in der ersten Iteration etwa konstant. Bei weiterer Modellverfeinerung steigt das Gewicht immer stärker an. Schließlich ist die Regularisierung so stark gewichtet, dass die entsprechenden Elemente der Normalgleichungsmatrix über alle Grenzen wachsen und diese nach etwa 40 Iterationen des dritten Bearbeitungsschrittes nicht mehr invertierbar ist. Das DGM folgt dieser Regularisierung, indem seine im zweiten Bearbeitungsschritt herausgebildeten Formen verflachen und es schließlich völlig glatt ist. Der regularisierte Ansatz ist also dahingehend sensibel, dass sich Bildzuordnung, welche die Oberflächenform herausmodelliert, und Glattheitsbedingungen, welche dieses (gezielt) unterdrücken, prinzipiell widersprechen und daher sorgfältig gewichtet werden müssen. Dazu ist die Varianzkomponentenschätzung offensichtlich ungeeignet, sofern die DGM-Facettierung weit unterhalb der durch Bildzuordnung bestimmbaren Auflösung liegt – siehe auch Bemerkungen zur signifikanten Auflösung im Abschnitt 6.3.3.3.

Aufgrund der plausiblen DGM-Modellierung in den ersten beiden Stufen und dem damit einhergehenden, stabilen normierten Regularisierungsgewicht wird dieses in einer erneuten Berechnung für die letzten beiden Schritte der Modellverfeinerung auf dem Niveau des zweiten konstant gehalten. Das Ergebnis ist als Perspektivansicht in Abbildung 6.20, links, dargestellt. Während die beiden Einschlagkrater in dem DGM grundsätzlich modelliert sind, zeigen sich einige Artefakte sowie starke Randverbiegungen. Die Lageauflösung von 2×2 Surfeln pro DGM-Facette im regularisierten Ansatz erscheint für dieses Gebiet zu fein. Das Aufschwingen in den Randbereichen wird durch den Vergleich mit MOLA bestätigt; ebenso ist der nordöstliche Krater zu tief modelliert – vgl. Abbildung 6.21, links.

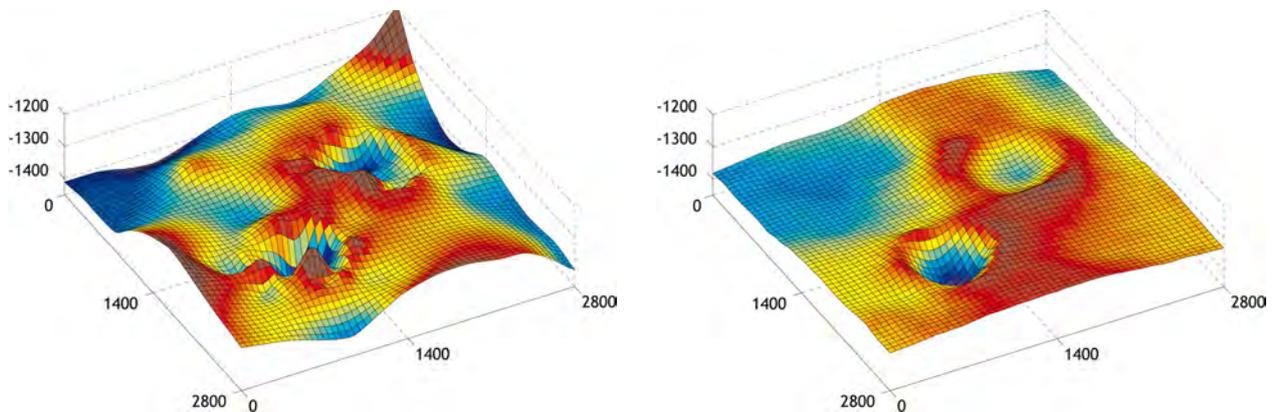


Abbildung 6.20: Perspektivansichten der DGMs aus regularisiertem Ansatz (links) und Photoklinometrie-Ansatz (rechts). Zahlenangaben in [m].

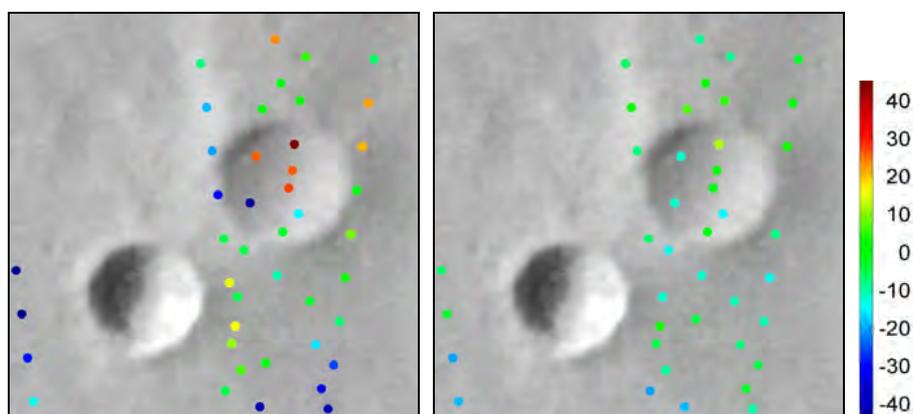


Abbildung 6.21: Höhendifferenzen zwischen MOLA und den DGMs aus regularisiertem Ansatz (links) und Photoklinometrie-Ansatz (rechts). Zahlenangaben in [m].

6.4.3 Photoklinometrie-Ansatz

Der Photoklinometrie-Ansatz basiert hier auf dem Lambertschen Reflexionsmodell und den Daten des Nadirkanals, welcher die höchste geometrische Bodenauflösung hat. Dieses Vorgehen ist identisch zu der von DORRER et al. (2005) und DORRER & KIRK (2007) beschriebenen Shape-from-Shading-Methode, sodass im Vergleich zum DGM *DLR-Scholten/UniBwM* keine systematischen Unterschiede in der radiometrischen Modellierung vorliegen.

Im Gegensatz zur Regularisierung liefert der Photoklinometrie-Ansatz bei einer DGM-Auflösung von 2×2 Orthobildsurfeln ein sehr gutes Ergebnis (Abbildung 6.20), was durch den unabhängigen Vergleich mit MOLA bestätigt wird (Abbildung 6.21). Dabei basiert der Gewichtsparameter zwischen Bildzuordnung und Photoklinometrie in allen Bearbeitungsschritten auf den Varianzkomponenten. Das im regularisierten Ansatz auftretende Anwachsen ist nicht zu beobachten, da (bei korrekter radiometrischer Parametrisierung) Bildzuordnung und Photoklinometrie sich nicht widersprechen, sondern beide die Oberfläche herausformen. Dennoch sind die Höhen des endgültigen, hochaufgelösten DGMs im Gebiet der beiden Krater überwiegend durch die Photoklinometrie kontrolliert.

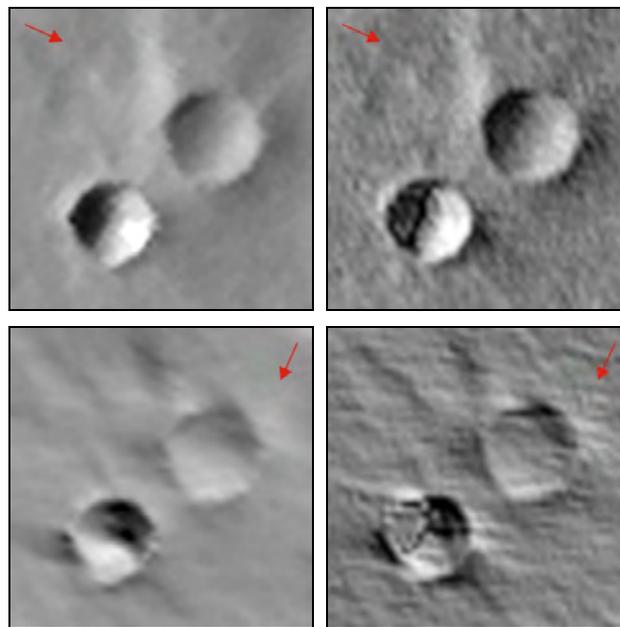


Abbildung 6.22: Schattierte Reliefs des Kratergebietes aus originaler Bestrahlung (oben) sowie unter senkrechtem Azimut (unten). Links: Photoklinometrie-Ansatz. Rechts: Vergleichs-DGM *DLR-Scholten/UniBwM*.

Der Vergleich mit dem DGM *DLR-Scholten/UniBwM* wird in Abbildung 6.22 anhand schattierter Reliefs sowie in Abbildung 6.23 anhand von Höhenlinien, die dem hier bestimmten Orthobild überlagert sind, vorgenommen. Die Reliefs basieren jeweils auf der originalen Bestrahlung und auf dem dazu senkrechten Azimut. Letztere decken die aufgrund des Lambert-Reflexionsmodells entstehenden, richtungsabhängigen Qualitätsunterschiede auf, die in *DLR-Scholten/UniBwM* stärker hervortreten als im Photoklinometrie-Ansatz, da letzterer auch Bildzuordnung einbezieht. Im Vergleich zeigt das original bestrahlte Relief aus dem hier abgeleiteten DGM eine bessere Übereinstimmung mit dem Orthobild als *DLR-Scholten/UniBwM*, welches hochfrequente Artefakte aufweist – erkennbar in den Reliefdarstellungen und im Höhenlinienbild. Auch die Form des südwestlichen Kraters ist nicht plausibel. Die Modellierung dieses Kraters wird im folgenden Abschnitt genauer betrachtet.

6.4.4 Analyse der Kraterform

Der südwestliche der beiden Krater im Bearbeitungsgebiet ist sowohl in den hier bestimmten DGMs als auch in den Vergleichsdaten stark unterschiedlich repräsentiert. Das ist zum Teil in dem Schattenbereich begründet, der insbesondere die Photoklinometrie beeinflusst. Andererseits erlaubt dieser Schatten, der etwa bis in den tiefsten Punkt des Kraters reicht, eine einfache und verlässliche Berechnung seiner Tiefe, sodass die Qualität der DGMs dahingehend beurteilt werden kann.

Zuerst soll jedoch die Modellierung der Form dieses augenscheinlich regelmäßigen, runden Kraters analysiert werden, welche zwar durch das DGM des Photoklinometrie-Ansatzes bestätigt wird, aber in *DLR-Scholten/UniBwM* elliptisch wirkt (Abbildung 6.23, links bzw. rechts). Dies geht einher mit einem stark sattelförmig ausgeprägten Kraterstand – beim reinen Shape-from-Shading zeigt sich eine deutliche Ausrichtung nach der Bestrahlung.

Am Beispiel dieser regelmäßigen Kraterformen lässt sich auch der Unterschied zwischen der von der Bildzuordnung (Bildtextur) abhängigen und einer über das Gebiet gleich gewichteten Photoklinometrie demonstrieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.23, Mitte, gezeigt. Erwartungsgemäß werden die Unterschiede an den kontrastreichen Abschnitten, also an den beiden Kratern, deutlich, da sich hier das Gewichtungsverhältnis am stärksten ändert. Die dann höher gewichtete Photoklinometrie verursacht Verformungen, die nicht plausibel sind: Höhenlinien werden (leicht) elliptisch und es entsteht im Ansatz die Sattelform der Ränder ähnlich *DLR-Scholten/UniBwM*. Damit bestätigt sich auch praktisch der Nutzen der in den Abschnitten 4.6.3 und 4.7 vorgeschlagenen, texturabhängigen lokalen Gewichtung.

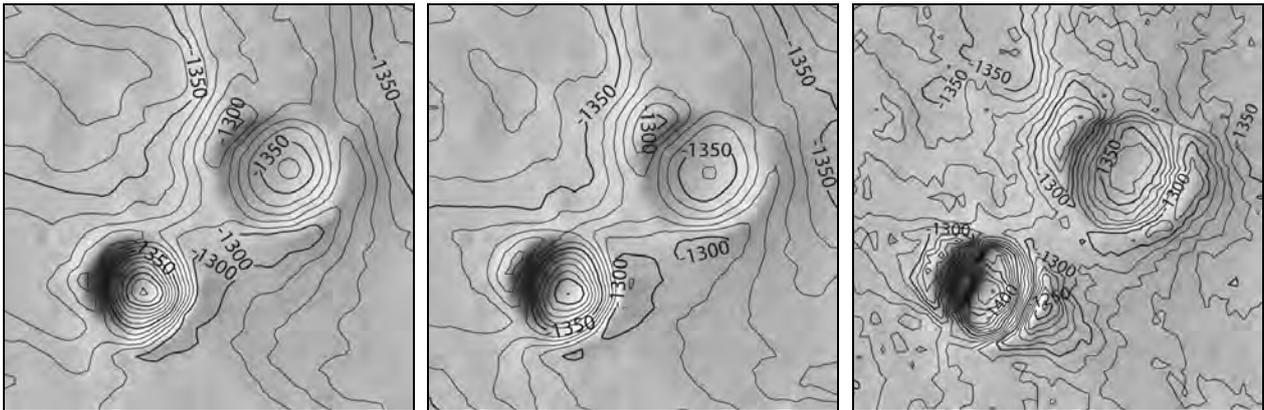


Abbildung 6.23: Gegenüberstellung unterschiedlicher Photoklinometrie-Ansätze. Links: Datenabhängige Gewichtung. Mitte: Gleichgewichtung im gesamten Gebiet. Rechts: Vergleich mit *DLR-Scholten/UniBwM*.

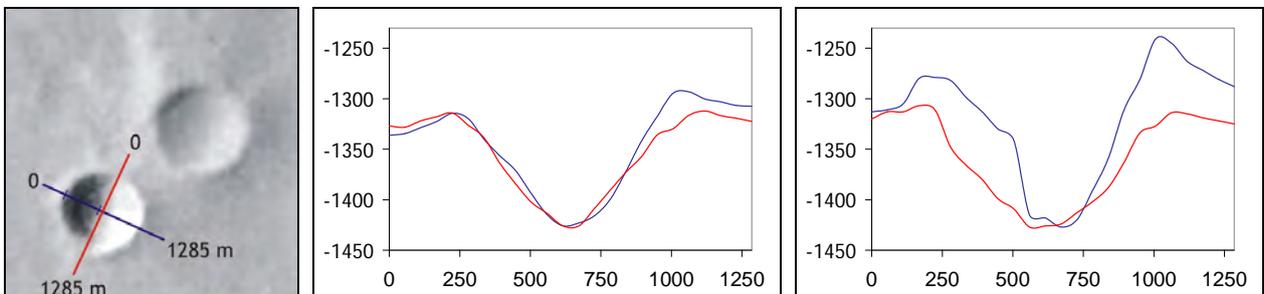


Abbildung 6.24: Überlagerung von Kraterprofilen in Richtung der Sonnenbestrahlung (WNW-OSO, blau) und senkrecht dazu (NNO-SSW, rot). Mitte: Photoklinometrie-Ansatz. Rechts: *DLR-Scholten/UniBwM*. Zahlenangaben in [m].

Um den Einfluss der Bestrahlung auf die modellierte Kraterform zu analysieren, werden in Abbildung 6.24 Höhenprofile für den Photoklinometrie-Ansatz und *DLR-Scholten/UniBwM* gegenübergestellt, für jedes DGM in Bestrahlungsrichtung (WNW-OSO) und senkrecht dazu (NNO-SSW). Die Überlagerung

dieser Profile zeigt, dass im Photoklinometrie-Ansatz der symmetrisch erscheinende Krater auch (nahezu) symmetrisch modelliert wird. Das Profil quer zur Bestrahlungsrichtung ist *DLR-Scholten/UniBwM* ähnlich, während in der Bestrahlungsrichtung signifikante Unterschiede bestehen und die Kraterform in letzterem nicht plausibel ist. Aus dem Schatten resultiert ein gleichmäßiges Gefälle, dessen Neigung dem Zenitwinkel der Bestrahlung entspricht. Dieses Verhalten deutet sich bei der Integration mit Bildzuordnung lediglich an.

Die Kratertiefen entlang des WNW-OSO-Profiles schwanken zwischen den hier bestimmten und den Vergleichs-DGMs von 23 m bis 227 m, d.h. um den Faktor 10. Zur Beurteilung der einzelnen Werte können das Verhältnis des Kraterdurchmessers (725 m) zur -tiefe von 5:1 (SCHULTZ 2001), also maximal 145 m⁴⁸, sowie der aus der Schattenlänge von 340 m (in Abbildung 6.24, links, markiert) und dem Zenitwinkel der Bestrahlung von 71,2° (Tabelle 6.12) abgeleitete Höhenunterschied von 116 m dienen. Die Kratertiefe sollte in diesem Wertebereich liegen, wobei die angegebene Schattenlänge der zuverlässigere Wert ist.

Die Gegenüberstellung der Höhenunterschiede zwischen Kratermitte und Ost- bzw. Westrand in Tabelle 6.13 zeigt, dass der Photoklinometrie-Ansatz sehr gut mit den Vergleichswerten übereinstimmt und insbesondere den aus der Schattenlänge berechneten Höhenunterschied bestätigt. Wie schon in den Profilen zu sehen, sind die Kraterränder in *DLR-Scholten/UniBwM* zu hoch. Beide auf Bildzuordnung basierende Modellierungen sind für diesen Krater fehlerhaft: Während die Regularisierung mit Glattheitsbedingungen den Krater enthält, aber eine zu große Tiefe erzwingt, ist er in *DLR-Gwinner* nicht signifikant; dieses DGM wirkt geglättet (vgl. Abbildung 6.17).

Tabelle 6.13: Höhendifferenzen zwischen Kraterand und -boden entlang des WNW-OSO-Profiles aus Abbildung 6.24. Für im Rahmen dieser Arbeit berechnete DGMs sind Standardabweichungen aus den relativen Höhenfehlern (vgl. Abschnitt 6.3.3.3) abgeleitet. Da derartige Informationen für den *HRSC DTM Test* nicht vorliegen, sind die angegebenen Genauigkeiten aus den von HEIPKE et al. (2007) ermittelten RMSs der Höhendifferenzen zu MOLA – mit Fehlerfortpflanzung für die Differenzberechnung – entnommen. Die Standardabweichung der aus der Schattenlänge bestimmten Höhendifferenz basiert auf einer Interpretations- und Messgenauigkeit von 0,5 Orthobildsurfeln (= 12,5 m) für Beginn und Ende des Schlagschattenbereiches, wobei der Sonnenstand zum Zeitpunkt der Aufnahme sehr genau bekannt ist und als fehlerfrei angenommen wird.

Datengrundlage		Westrand	Ostrand
Bildzuordnung:	Regularisierter Ansatz	216 m ± 31 m	227 m ± 31 m
	<i>DLR-Gwinner</i>	27 m ± 27 m	23 m ± 27 m
Photoklinometrie:	Photoklinometrie-Ansatz	110 m ± 5 m	133 m ± 7 m
	<i>DLR-Scholten/UniBwM</i>	148 m ± 33 m	186 m ± 33 m
Vergleichsdaten:	Schattenlänge	116 m ± 6 m	
	Durchmesser/Tiefe	< 145 m	< 145 m

Die sehr gute Modellierung der Kraterform und -tiefe im Photoklinometrie-Ansatz wird auch durch den unabhängigen Vergleich mit der MOLA-Referenz bestätigt. Zwar ist der hier betrachtete Krater von MOLA nicht erfasst, aber im gesamten Bereich des Nachbarkraters sind die Höhendifferenzen klein (vgl. Abbildung 6.21, rechts).

⁴⁸ Die Kratertiefe und damit auch dieses Verhältnis nehmen aufgrund von Erosion und Sedimentation mit dem Alter des Kraters ab. Der nordöstliche Krater im Bearbeitungsgebiet beispielsweise ist trotz seines größeren Durchmessers flacher als der hier betrachtete.

Bei der Analyse des Kratergebietes einschließlich der Vergleiche mit dem *HRSC DTM Test* zeigt sich deutlich der Vorteil der Integration von Bildzuordnung und Photoklinometrie. Sowohl die alleinige Bildzuordnung als auch die alleinige Photoklinometrie liefern nicht so gute Ergebnisse für die Modellierung von Details wie deren Kombination in einem gemeinsamen Ansatz. Dabei ist die explizite Formulierung von Beobachtungsgleichungen für beide Verfahren (vgl. Abschnitt 4.7) die Voraussetzung für die texturabhängige Gewichtung und damit die gezielte Ergänzung des Facetten-Stereosehens durch Photoklinometrie.

6.5 Bergland im Gusev-Krater: Bestimmung der Hapke-Parameter

Der Krater *Gusev* ist von besonderem wissenschaftlichen Interesse, da sich hier die Landestelle des *Mars Exploration Rovers Spirit* befindet. Das Gebiet wurde und wird daher von der HRSC und anderen bildgebenden Experimenten wiederholt aufgenommen. Aus diesen Daten liegt eine Reihe wissenschaftlicher Untersuchungsergebnisse vor, u.a. auch Hapke-Modellierungen, welche als Vergleich für die nachfolgend abgeleiteten Materialparameter dienen.

6.5.1 Bearbeitungsgebiet und HRSC-Daten

Das Bearbeitungsgebiet liegt in einer Tafellandschaft südlich der *Spirit*-Landestelle, bei etwa $175,5^\circ$ Ost und $15,4^\circ$ Süd. Aus den zur Verfügung stehenden HRSC-Daten wird hier der Orbit 648 gewählt, bei dem das Gebiet aus großen Höhen aufgenommen wurde. Dies zieht zwar vergleichsweise geringe Bodenaufösungen nach sich, impliziert aber auch größtmögliche Beobachtungswinkeldifferenzen, sodass – mit dem Schwerpunkt auf der Ableitung der Hapke-Parameter – eine günstige Konfiguration für die radiometrische Modellierung vorliegt. Die Gebietsgröße beträgt $24,0 \text{ km} \times 24,0 \text{ km}$.

Innerhalb des elliptischen *Mars-Express*-Orbits steigt der Aufnahmeabstand über die einzelnen HRSC-Kanäle stark an, sodass sich zunehmende Auflösungsunterschiede zwischen Zeilen- und Flugrichtung ergeben und die Originaldaten teils stark verzerrt sind (Abbildung 6.25). Der Kanal Stereo 2 wurde im Bearbeitungsgebiet nicht aufgenommen. Für die Oberflächenmodellierung stehen damit vier panchromatische Kanäle zur Verfügung (Tabelle 6.14).

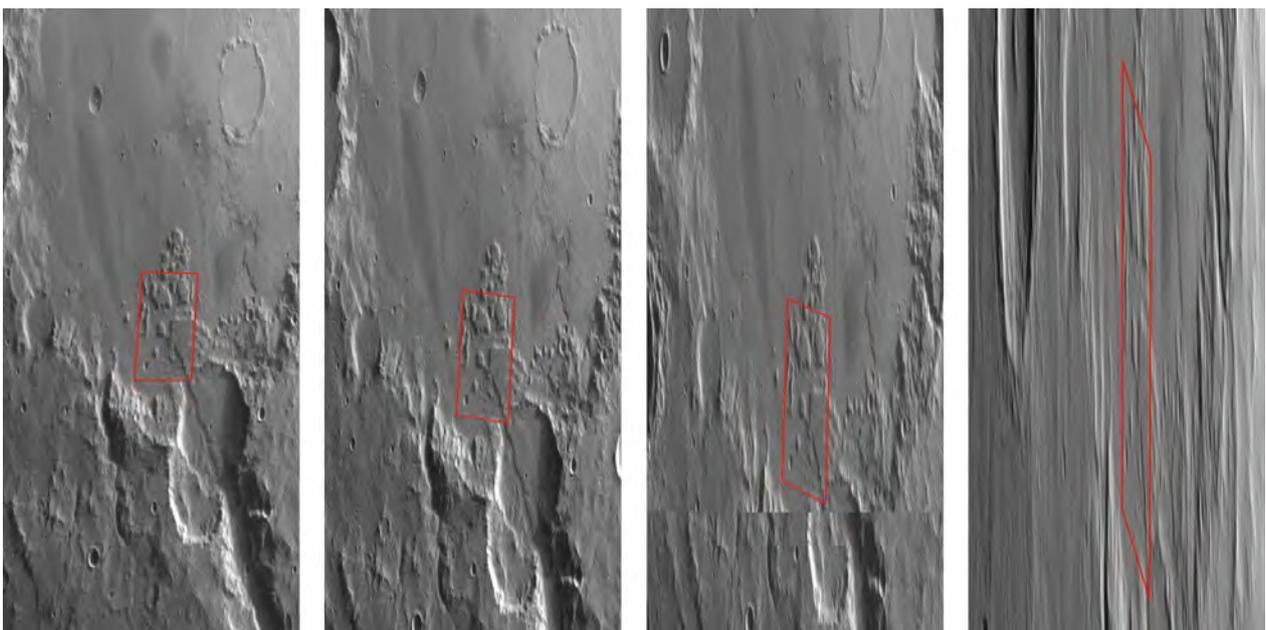


Abbildung 6.25: Abdeckung des Bearbeitungsgebietes (rot markiert) im Orbit 648, Kanäle: Stereo 1, Photometrie 1, Nadir und Photometrie 2 (v.l.n.r.). Im Nadirkanal ist eine Datenlücke erkennbar.

Tabelle 6.14: Orbit 648, Beobachtungsgeometrie im *Gusev*-Bergland.

Kanal	Auflösung	Bestrahlungswinkel θ_i		Beobachtungswinkel θ_r		Phasenwinkel α	
		Niveau	Facetten	Niveau	Facetten	Niveau	Facetten
Stereo 1	281 m	81,2°	55,6° – 90,0°	31,2°	10,8° – 60,0°	91,8°	91,4° – 92,1°
Photo 1	289 m	80,8°	55,1° – 90,0°	21,4°	1,6° – 50,7°	87,1°	86,8° – 87,5°
Nadir	165 m	79,6°	53,9° – 90,0°	2,1°	0,0° – 31,3°	77,6°	77,3° – 77,9°
Photo 2	448 m	76,7°	50,9° – 90,0°	29,5°	5,4° – 50,7°	67,1°	66,9° – 67,4°

6.5.2 Modellierung mit dem integrierten Ansatz

Das Tafelland im südlichen *Gusev*-Krater wird mit dem integrierten Ansatz ausgewertet. Die Orthobildauflösung beträgt in Anlehnung an die Bilddaten 250 m. Die Parameter des Lunar-Lambert-Reflexionsmodells werden im gesamten Gebiet als konstant angenommen und das DGM schrittweise von 4 km x 4 km auf 500 m x 500 m verringert. Das endgültige DGM ist in Abbildung 6.26 dargestellt. Abbildung 6.27 zeigt die Überlagerung von Höhenlinien und Orthobild sowie den Vergleich zur MOLA-Höhenreferenz.

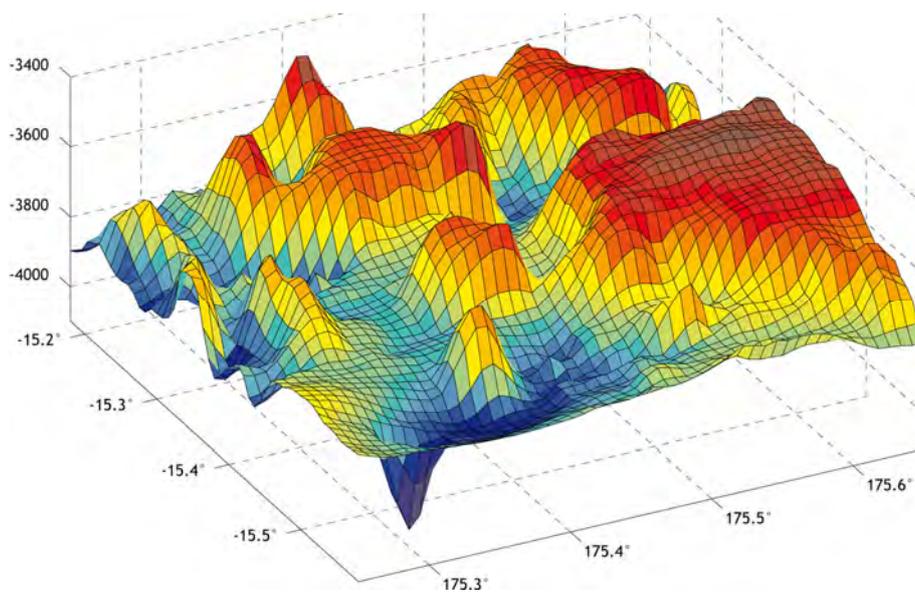


Abbildung 6.26: Perspektivansicht des DGMs. Blick von Südwesten, Höhenangaben in [m].

Während das Höhenlinienbild die Plausibilität des DGMs bestätigt, fällt im Vergleich mit MOLA eine Systematik auf: Es zeigen sich teilweise große Höhenunterschiede von über 200 m, welche in Bereichen quer zur Flugrichtung – mit einer Bahninklination von 86,3° im *Mars-Express*-Orbit 648 (JAUMANN et al. 2007) – in ähnlicher Größenordnung liegen. Die Bereiche größter Abweichung befinden sich im Norden und im Süden des Bearbeitungsgebietes sowie in kleinerem Umfang auch in der Mitte; dazwischen schwanken die Höhendifferenzen um 0 m. Diese Abweichungen sind allerdings nicht im Modellierungsansatz begründet, sondern in der äußeren Orientierung der HRSC. Die im MOLA-Vergleich erkennbaren

Positionsschwankungen⁴⁹ sind in mehreren Orbits in einem Zeitfenster von einigen Monaten feststellbar, wurden aber, da es für sie keine Erklärung gab, in der Bündelblockausgleichung nicht korrigiert (SPIEGEL 2007). Daher entstehen langperiodische Verbiegungen im hier abgeleiteten DGM.

Allerdings beeinflussen diese Verbiegungen lokale Neigungen nur geringfügig und haben damit nur marginale Auswirkung auf die radiometrische Modellierung – insbesondere auch, weil die Reflexionsparameter über das gesamte Bearbeitungsgebiet als konstant angenommen werden.

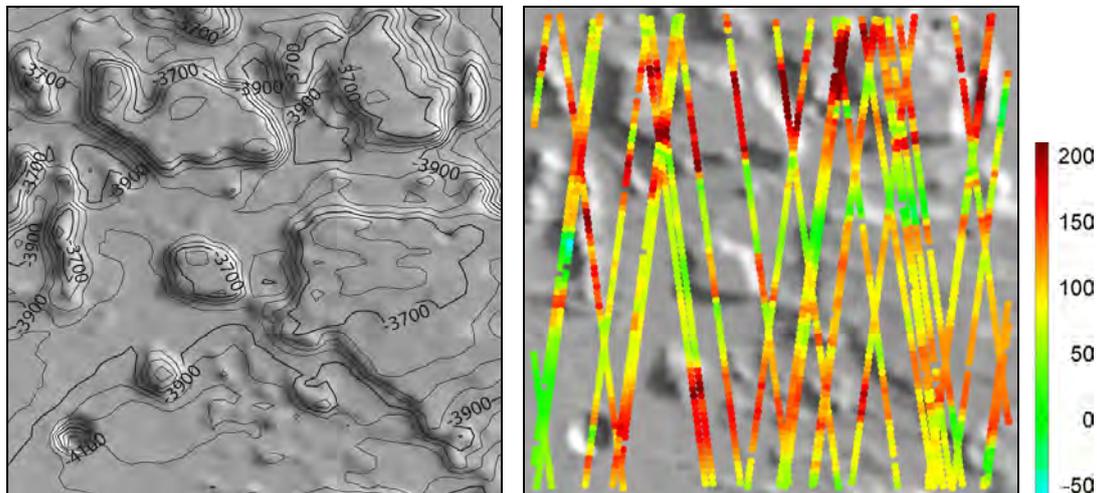


Abbildung 6.27, links: Überlagerung von Höhenlinien und Orthobild. Rechts: Höhendifferenzen zwischen MOLA und dem hier abgeleiteten DGM. Zahlenangaben in [m].

6.5.3 Ableitung des Hapke-Modells

Aufbauend auf die Ergebnisse des integrierten Ansatzes, DGM und Lunar-Lambert-Modell, werden die Parameter des Hapkeschen Reflexionsmodells abgeleitet. Die im Ansatz mitbestimmte optische Dichte der Atmosphäre⁵⁰ zeigt aufgrund der guten Beobachtungsgeometrie den höchsten Qualitätsfaktor aller in dieser Arbeit untersuchten Gebiete. Auch die in der Ausgleichung mitbestimmten Luftlichteinflüsse sind plausibel (siehe Diskussion der Atmosphärenmodellierung im Abschnitt 6.7.3), sodass die nachfolgenden Rechnungen auf zuverlässig atmosphärisch korrigierten Bilddaten basieren.

6.5.3.1 Modellierung und Ergebnisse

Wie im Abschnitt 6.3.4.3 am Beispiel der *Nanedi Valles* beschrieben, werden auch hier die Parameter des Hapke-Modells für das gesamte Bearbeitungsgebiet angesetzt und durch vermittelnde Ausgleichung geschätzt. Im Vier-Parameter-Modell nach (3.63) erscheint dabei das Gewicht c der Double-Henyey-Greenstein-Funktion hoch, sodass auch ein Drei-Parameter-Modell unter der Vorgabe $c = 1$ bestimmt wird. Die Ergebnisse beider Berechnungen sind in Tabelle 6.15 gegenübergestellt. Die Reduktion des Modells von vier auf drei Parameter wird auch durch die in

Tabelle 6.16 angegebenen Korrelationskoeffizienten gerechtfertigt: In der Double-Henyey-Greenstein-Funktion sind b und c stark negativ korreliert. Die ebenfalls hohe Korrelation zwischen Teilchenalbedo w

⁴⁹ Dazu sei angemerkt, dass das Ergebnis der Modellierung aus einer Überlagerung von Bahnfehlern resultiert, da die einzelnen Kanäle aus unterschiedlichen Punkten des Orbits aufgenommen wurden.

⁵⁰ Die optische Dichte wird hier aus den Kanälen Stereo 1 und Photometrie 2 bestimmt. Die effektiven Stereowinkel sind ähnlich und erlauben damit auch die Berechnung des Qualitätsfaktors nach Gleichung (4.40).

und Rauigkeit $\bar{\theta}$ sowie die Korrelationen dieser beiden Parameter mit b werden durch die Reduktion aber kaum beeinflusst. Das Verhalten der Ergebnisse sowie deren Korrelationen bestätigen die theoretischen Überlegungen aus Abschnitt 5.3, insbesondere aus dem Teilabschnitt 5.3.5.

Tabelle 6.15: Hapke-Parameter auf Basis des integrierten Ansatzes und Vergleich mit unabhängigen Modellierungen aus Bilddaten der HRSC.

Parameter	Modell: 4 Parameter	Modell: 3 Parameter	JEHL et al. (2006)	PINET et al. (2005)	JEHL et al. (2008)	PINET et al. (2006)
w	$0,851 \pm 0,002$	$0,869 \pm 0,002$	0,78 ... 0,84		0,79 ... 0,88	
b	$0,141 \pm 0,005$	$0,294 \pm 0,002$	0,20 ... 0,30		0,15 ... 0,45	0,21 ... 0,31
c	$1,821 \pm 0,042$	1	0,50 ... 0,65	0,45 ... 0,65	0,10 ... 0,55	0,56 ... 0,67
$\bar{\theta}$ [°]	$29,5 \pm 0,4$	$32,3 \pm 0,9$	25 ... 30	23 ... 27	5 ... 25	19 ... 26

Tabelle 6.16: Korrelationen zwischen den hier bestimmten Hapke-Parametern.

	Modell: 4 Parameter			Modell: 3 Parameter	
	$\bar{\theta}$	b	c	$\bar{\theta}$	b
w	0,98	0,26	-0,22	0,98	0,29
$\bar{\theta}$		0,19	-0,15		0,23
b			-0,99		

Von den im Abschnitt 5.5.3.3 beschriebenen Hapke-Vergleichsdaten im südlichen *Gusev*-Gebiet kommen die von PINET et al. (2005) und JEHL et al. (2006), die das Vier-Parameter-Modell aus HRSC-Daten abgeleitet haben, vom Modellierungsansatz her dieser Arbeit am nächsten. Die Werte sind zwar aufgrund des dort nicht separierten Atmosphäreneinflusses nicht unmittelbar vergleichbar, zeigen aber – bis auf den Parameter c – eine sehr gute Übereinstimmung. Die Untersuchungen von JEHL et al. (2008), die auf einem Sechs-Parameter-Modell (einschließlich des Oppositionseffektes SHOE) basieren, sowie PINET et al. (2006) bestätigen grundsätzlich die Plausibilität der hier bestimmten Werte. Ein Vergleich aller in Tabelle 6.15 aufgeführter Ergebnisse – vgl. insbesondere die größeren Wertebereiche in der Modellerweiterung⁵¹ von JEHL et al. (2008) – zeigt aber auch, dass die Berechnung von Hapke-Parametern ein komplexes Problem darstellt.

In den Vergleichsdaten ist festzustellen, dass im Bearbeitungsgebiet teils breit gestreute Werte auftreten. Daher liegt es nahe, die Hapke-Parameter in Facetten und so mögliche lokale Unterschiede zu modellie-

⁵¹ Dazu muss angemerkt werden, dass in der Erweiterung der Studie von PINET et al. (2005) über JEHL et al. (2006) bis JEHL et al. (2008) nicht nur ein verändertes Hapke-Modell angesetzt wurde, sondern auch alle jeweils verfügbaren HRSC-Daten einbezogen und damit die Datengrundlage vergrößert wurde. Weitere Unterschiede liegen im verwendeten DGM – beispielsweise haben PINET et al. (2005) eine ebene Geometrie angenommen und dementsprechend für Hanglagen keine Daten abgeleitet. Daher liegen aus den einzelnen Auswertungen auch unterschiedlich viele Vergleichswerte innerhalb des Bearbeitungsgebietes vor.

ren. Ein derartiger Ausgleichungsansatz zeigt jedoch hier keine Konvergenz.⁵² Betrachtet man allerdings die Relationen zwischen den Bildauflösungen und den angenommenen Gültigkeitsbereichen der Hapke-Parameter – im Nadir 165 m/Pixel bei 24 km Gebietsgröße in dieser Arbeit, bis zu 10 m/Pixel bei 1,6 km Hapke-Modellierung in den Vergleichsdaten –, so sind diese ähnlich. Es liegen damit etwa gleich viele Beobachtungen (je HRSC-Kanal) für die Bestimmung eines Hapke-Parametersatzes vor. Dass auch in den Vergleichsdaten Lücken existieren, in denen kein Reflexionsmodell bestimmbar war, unterstreicht noch einmal die Schwierigkeiten bei der praktischen Modellierung.

6.5.3.2 Analyse von Teilchenalbedo und makroskopischer Rauigkeit

Für die Bewertung der Teilchenalbedo ist zu beachten, dass sie aufgrund der hier und auch in den Vergleichsdaten nicht modellierten Porosität zu groß ausfällt (vgl. Abschnitt 5.3.4). Nach DOMINGUE & CHENG (2000) sind die so berechneten Werte um bis zu 0,05 zu hoch. Der Effekt macht sich am stärksten bei hellem Material in Kombination mit dominierender Rückstreuung, also für die hier ermittelten Ergebnisse, bemerkbar. Die Teilchenalbedo im Gebiet des südlichen *Gusev*-Tafellandes beträgt demnach, um den genannten Betrag korrigiert, etwa 0,80-0,82. Das Oberflächenmaterial ist damit im panchromatischen Wellenlängenbereich HRSC von 675 ± 90 nm sehr hell; vgl. Daten für unterschiedliche Regionen des Mars in SODERBLOM et al. (2006) oder JOHNSON et al. (2008).

Die hier bestimmte makroskopische Rauigkeit liegt im oberen Bereich der für den Mars typischen Werte (JOHNSON et al. 2008). Da die Rauigkeit tendenziell mit der Korngröße zunimmt (vgl. HELFENSTEIN & SHEPARD 2003, CORD et al. 2005), ist ein derart hoher Wert ein Hinweis auf ein grobkörniges Oberflächenmaterial.

6.5.3.3 Analyse der Phasenfunktion

Die Parameter der Henyey-Greenstein-Funktion lassen auf eine deutliche Rückstreuung schließen ($c \geq 1$), die allerdings nicht stark gerichtet ist ($b > 0$). Um aus diesen empirischen Parametern auf Materialeigenschaften zurückzuschließen, ist der ermittelte Wertebereich in das b-c-Diagramm nach Abbildung 3.4 eingetragen – siehe Abbildung 6.28. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Studie von PINET et al. (2005) und JEHL et al. (2006) markiert.

Wie aus dem b-c-Diagramm erkennbar, lassen die hier bestimmten Parameter auf Oberflächenpartikel mit hoher interner Streudichte schließen, während die Vergleichsdaten eine nicht so starke Rückstreuung zeigen und somit eine mittlere interne Streudichte nahelegen.⁵³ Hohe Werte für c und die damit einhergehende dominierende Rückstreuung weisen neben der mittleren bis hohen Konzentration interner Streuteilchen auch auf große Korngrößen hin (CORD et al. 2005). Dies wird durch die obige Schlussfolgerung aus der makroskopischen Oberflächenrauigkeit bestätigt.

Einen wichtigen Schlüssel für die Interpretation der Modellparameter liefert ihr Vergleich mit Labordaten. Daher werden in Abbildung 6.29 die Henyey-Greenstein-Funktion mit einem Parameter (HG1) und die Double-Henyey-Greenstein-Funktion (HG2), berechnet aus den hier ermittelten Werten für b und c, den Labormessungen von MCGUIRE & HAPKE (1995) für einen Partikel mit hoher interner Streudichte gegenübergestellt. Dabei zeigen beide eine gute Anpassung an die Daten in mittleren Phasenwinkelbereichen, wobei die HG2-Funktion – trotz des hoch erscheinenden Parameters $c = 1,821$ – hier sogar leicht überlegen ist (RMSE 50-130°: 0,12 für HG1 und 0,10 für HG2). Die HG1-Funktion stellt die insgesamt bessere An-

⁵² Auf ein Zwei-Parameter-Modell mit w und b, das dann Ergebnisse liefern würde, wird hier nicht eingegangen. Die Interpretationsmöglichkeiten in Bezug auf Material- und Oberflächeneigenschaften wären begrenzt.

⁵³ Im Vergleich dazu zeigen die Ergebnisse von JEHL et al. (2008) sogar eine tendenzielle Vorwärtsstreuung, einhergehend mit breiterer Strahlungskeule, was auf eine noch geringere Dichte interner Streupartikel hindeutet.

passung dar (RMSE 5-165°: 0,10 für HG1 und 0,22 für HG2). Die von den Messdaten abweichende Extrapolation der HG2-Funktion für große Phasenwinkel ist der in Abbildung 5.2, unten rechts, sehr ähnlich. Neben der grundsätzlich guten Übereinstimmung der in *Gusev* bestimmten Parameter mit den Labor-daten eines Teilchens mit hoher interner Streudichte bestätigen sich hier auch die Berechnungen und Überlegungen aus Abschnitt 5.3.2 zur Parametrisierung der Henyey-Greenstein-Funktion für HRSC-Daten sowie zum Extrapolationsverhalten aus Phasenwinkelteilbereichen (z.B. Unbestimmtheit für $c \rightarrow 1$, Vergrößerung des L-förmigen Wertebereiches).

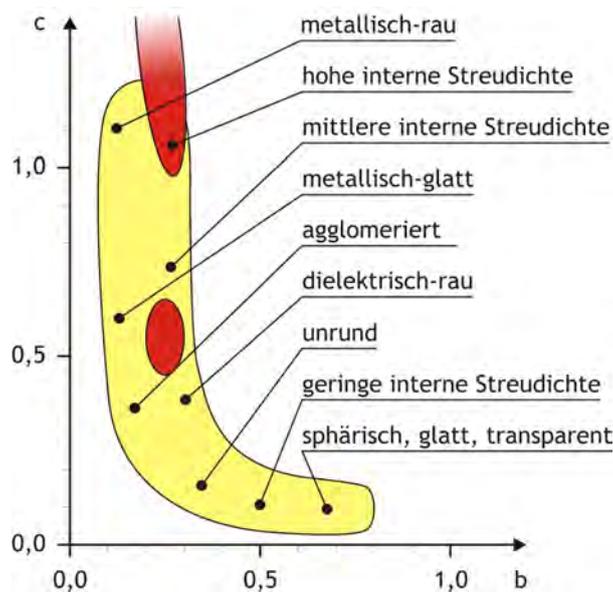


Abbildung 6.28: Rückschluss auf die Teilchenstruktur anhand der Parameter b und c entsprechend Abbildung 3.4, Ergebnisse aus der Hapke-Modellierung und Vergleichsdaten von JEHL et al. (2006)/PINET et al. (2005) rot markiert.

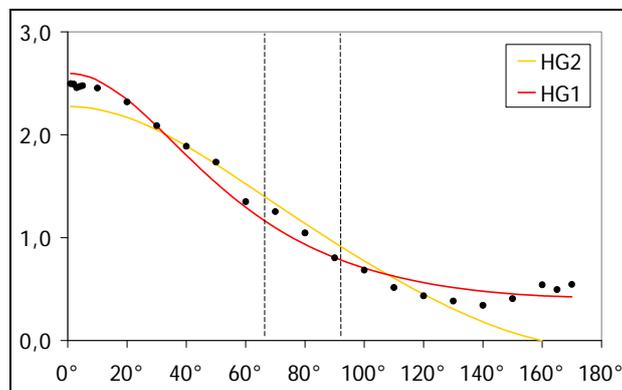


Abbildung 6.29: Vergleich der aus HRSC-Daten im *Gusev*-Bergland (Phasenwinkelbereich zwischen den gestrichelten Linien) bestimmten Henyey-Greenstein-Funktionen mit ein und zwei Parametern (HG1 und HG2) mit den Labor-messungen von MCGUIRE & HAPKE (1995) für einen Partikel mit hoher interner Streudichte. Vgl. Abbildung 5.2 unten.

6.5.3.4 Rekonstruktion der Orthobilder

Zum Abschluss der radiometrischen Modellierung sollen beispielhaft die Orthobilder der einzelnen HRSC-Kanäle rekonstruiert werden, d.h. das Erscheinungsbild der Mars-Oberfläche unter der jeweiligen Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie ohne den Einfluss von atmosphärischer Dämpfung und Luftlicht. Die Berechnung entspricht dem in Gleichung (3.63) angegebenen Hapke-Reflexionsmodell und kann als Ableitung schattierter Reliefs aus dem DGM unter Verwendung von Hapke- statt Lambert-Parametern verstanden werden. Die Ergebnisse aus dem Drei-Parameter-Modell sind in Abbildung 6.30 dargestellt.

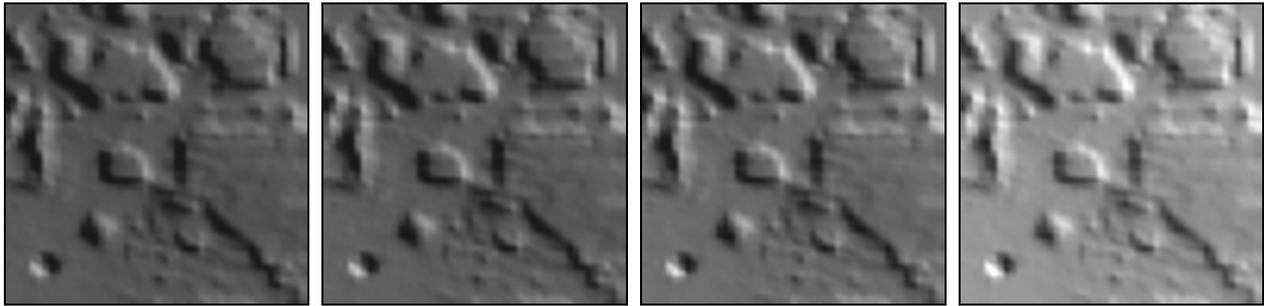


Abbildung 6.30: Rekonstruktion der Orthobilder, v.l.n.r.: Stereo 1, Photometrie 1, Nadir und Photometrie 2.

In den rekonstruierten Bildern wird insbesondere der Effekt der Rückstreuung deutlich (Phasenfunktion mit $c = 1$ und $b > 0$): Je kleiner der Phasenwinkel ist (Tabelle 6.14), desto heller erscheint die Oberfläche. Beim visuellen radiometrischen Vergleich mit den Originaldaten (Abbildung 6.25) ist zu beachten, dass die Mars-Atmosphäre hier nur 21% der von der Oberfläche reflektierten Strahlung durchlässt und außerdem das Luftlicht einen signifikanten Anteil an der von der HRSC detektierten Strahlung ausmacht. Die Korrelationskoeffizienten zwischen diesen Reliefs und den Orthobildern aus HRSC-Daten – welche von Atmosphäreinflüssen, die sich auf die Bilder (nahezu) linear auswirken, nur marginal beeinflusst werden – liegen im Bereich von 88,8% (Stereo 1) und 92,9% (Photometrie 2).

6.6 Lavafluss: Beispiel einer radiometrischen Problemregion

Wie im Abschnitt 4.8.1 angedeutet und für einige der Auswertgebiete praktisch bestätigt wird (siehe dazu Gegenüberstellung im Abschnitt 6.7.3), ist die Modellierung der Mars-Atmosphäre aus HRSC-Daten nicht trivial und führt auch nicht immer zu verlässlichen Ergebnissen. Für den im Folgenden diskutierten Lavafluss an der Nordflanke der *Apollinaris Patera* ist die optische Dichte aus der Stereomethode nur bei sehr kleinem Qualitätsfaktor bestimmbar; der Wert selbst erscheint mit $2,09 \pm 0,48$ recht hoch und auch in Anbetracht seines mittleren Fehlers für die zuverlässige Trennung radiometrischer Atmosphären- und Oberflächeneinflüsse ungeeignet. Dennoch soll hier der integrierte Ansatz für die Oberflächenmodellierung angewendet werden.

6.6.1 Bearbeitungsgebiet und HRSC-Daten

Das 3,2 km x 3,2 km große Bearbeitungsgebiet liegt bei 174,2° Ost und 6,8° Süd. Es wurde von der HRSC im Orbit 987 aufgenommen. Die Auswertung basiert auf den Stereokanälen und dem Nadirkanal, deren Eigenschaften in Tabelle 6.17 angegeben sind.

Tabelle 6.17: Orbit 987, Beobachtungsgeometrie für den Lavafluss.

Kanal	Auflösung	Bestrahlungswinkel θ_i		Beobachtungswinkel θ_r		Phasenwinkel α	
		Niveau	Facetten	Niveau	Facetten	Niveau	Facetten
Stereo 1	21,9 m	64,0°	24,1° – 90,0°	20,3°	0,0° – 54,5°	55,6°	55,3° – 55,9°
Nadir	10,9 m	64,1°	24,2° – 90,0°	0,6°	0,0° – 45,9°	64,7°	64,4° – 65,0°
Stereo 2	21,7 m	64,2°	24,2° – 90,0°	20,8°	0,0° – 66,0°	76,3°	76,1° – 76,6°

6.6.2 Modellierungsansatz

Der integrierte Ansatz wird wie im Abschnitt 4.8 beschrieben angewendet, also einschließlich der Korrektur der Bilddaten anhand der obigen optischen Dichte sowie unter Mitbestimmung des Luftlichteinflusses und des Lunar-Lambert-Modells in der gemeinsamen Ausgleichung. Diese umfasst neben der Photoklinometrie hier auch die Regularisierung mit Glattheitsbedingungen.

Für das Orthobild wird eine Auflösung von 25 m/Surfel gewählt; die DGM-Modellierung beginnt mit einer Facettengröße von 400 m x 400 m und wird stufenweise bis auf 50 m x 50 m reduziert. Die Parameter des Lunar-Lambert-Modells werden nicht in Lagefacetten aufgelöst.

6.6.3 Ergebnisse

Wie aufgrund der unzureichend genau bestimmbar optischen Dichte der Atmosphäre zu erwarten, sind die Parameter des Lunar-Lambert-Modells nicht glaubhaft: Die phasenwinkelabhängig modellierten Gewichte L liegen bei 0,75 (Stereo 1), 0,27 (Nadir) und 0,02 (Stereo 2); sie zeigen damit zwar die abnehmende Tendenz der im Abschnitt 5.4 beschriebenen Hapke-Approximationen, sind aber so durch kein Hapke-Modell reproduzierbar. Die beste Approximation würde durch eine mittlere makroskopische Rauigkeit von 20-25° bei einer Teilchenalbedo von $w \approx 0,1$ erzielt (vgl. Diagramme in MCEWEN 1991), was allerdings mit einer Normalalbedo $A_N \approx 0,03$ korrespondiert. Diese liegt sowohl unter den für die Mars-Oberfläche typischen Werten im Wellenlängenbereich um 675 nm als auch deutlich unter dem hier bestimmten Wert von $A_N = 0,12$. Es ist ersichtlich, dass die Atmosphären- und Oberflächeneigenschaften hier nicht korrekt getrennt werden können und sich die jeweiligen Einflüsse in verschiedenen Parametern des radiometrischen Gesamtmodells widerspiegeln.

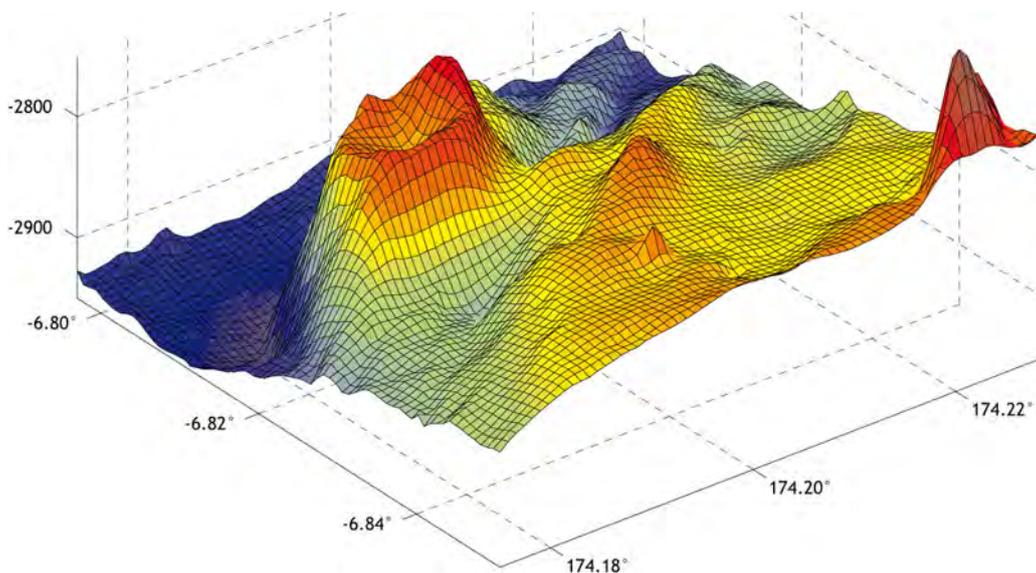


Abbildung 6.31: Perspektivansicht des DGMs. Blick von Südwesten, Höhen in [m].

Trotz der nicht erfolgreichen radiometrischen Oberflächenmodellierung kann ein plausibles DGM für das Bearbeitungsgebiet bestimmt werden, wie Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32 belegen. Die aus dem DGM abgeleiteten Höhenlinien passen sich sehr gut an den im Orthobild erkennbaren Geländeverlauf an und geben dabei auch morphologische Details so wieder, wie es ohne die Photoklinometrie nicht möglich ist – vgl. Gegenüberstellungen der Modellierungsansätze in den Abschnitten 6.3.3 und 6.4. Ähnlich wie im Photoklinometrie-Ansatz auf Basis des Lambertschen Reflexionsmodells erscheint in diesem Beispiel im integrierten Ansatz die Trennung radiometrischer Atmosphären- und Oberflächeneinflüsse nicht notwendig. Dies lässt sich allerdings so nicht aus Gleichung (3.1) und dem Lunar-Lambert-Modell (3.59) ableiten und ist daher keinesfalls allgemeingültig, sondern abhängig von den Daten, dem Bearbeitungsgebiet

(Atmosphäre; Reliefenergie und Textur) und der Modellierung (radiometrischer Freiheitsgrad). In diesem Zusammenhang sei auch auf die bei den *Nanedi Valles* beobachtete Stauchung der Höhen durch fehlerhafte Luftlichtparameter hingewiesen. Dieser Effekt tritt jedoch hier am Lavafluss nicht auf: Wie der Vergleich mit MOLA in Abbildung 6.32, rechts, zeigt, besteht in unterschiedlichen Höhenlagen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem HRSC-DGM. Die größten Abweichungen liegen bei etwa 30 m und treten im Nordwesten auf, in Hanglagen sowie am Gebietsrand.

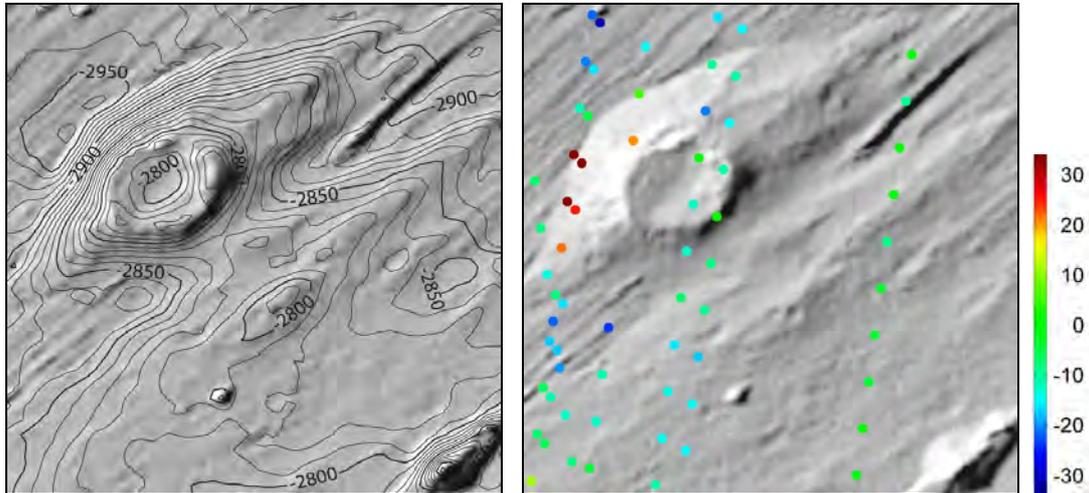


Abbildung 6.32, links: Überlagerung von Höhenlinien und Orthobild. Rechts: Höhendifferenzen zwischen MOLA und dem DGM. Zahlenangaben in [m].

Als Fazit für dieses Untersuchungsgebiet lässt sich festhalten, dass der integrierte Ansatz zur Oberflächenmodellierung auch angewendet werden kann, wenn die Bestimmung der optischen Dichte der Atmosphäre und damit die gesamte radiometrische Modellierung keine zuverlässigen Ergebnisse liefern. Die Parameter der Atmosphäre und das Reflexionsmodell der Oberfläche sind dann zwar schwer interpretierbar, müssen aber nicht zwangsläufig negative Auswirkungen auf die Geometrie haben. Eine solche Modellierung kann ein besseres DGM liefern als der gänzlich ohne Photoklinometrie auskommende und damit von der radiometrischen Parametrisierung unabhängige regularisierte Ansatz.

6.7 Diskussion

Wie an fünf Regionen der Mars-Oberfläche demonstriert, unterliegt die gemeinsame geometrische und radiometrische Oberflächenmodellierung vielfältigen Einflüssen, die sich sehr unterschiedlich bemerkbar machen können. Daher werden im Folgenden die wesentlichen Ergebnisse und Charakteristiken der vier Ansätze zusammengefasst und anhand der Beispiele vergleichend diskutiert, wobei schließlich auch die Grenzen der Modellierung verdeutlicht werden.

6.7.1 Fenstergröße, Facettierung und sukzessive Modellverfeinerung

Grundlage des Facetten-Stereosehens und damit auch der weiterentwickelten Ansätze ist die Festlegung geeigneter Facettengrößen für die einzelnen Oberflächenmodelle. Dies gilt sowohl für deren endgültige Auflösung als auch für die Anfangswerte der sukzessiven Verfeinerung.

Die Anfangsfacettierung hängt von der Qualität des verfügbaren Start-DGMs ab. Sie wird im Rahmen der Arbeit vergleichsweise grob gewählt, da die Modellierungen auf einem MOLA-DGM mit nur 5 km Lageauflösung aufbauen. Wie insbesondere am Kraterrand im Abschnitt 6.2.3 verdeutlicht wird, weist der Algorithmus einen großen Konvergenzradius auf (vgl. auch ANDERSSOHN 2004). Die Auflösung des Ortho-

bildes sollte an die Bilddaten angelehnt werden. Es kann zwar zu Beginn der Modellierung in größeren Surfeln berechnet werden, der praktische Nutzen, z.B. in Bezug auf die Zeitersparnis, ist allerdings gering. Die meiste Rechenzeit wird während der Iterationen der feinsten Facettierungsstufe verwendet, welche schließlich auch die Anzahl der unbekanntenen Modellparameter definiert bzw. die Bearbeitungsfenstergröße (abhängig von dem für die Berechnung zur Verfügung stehenden Arbeitsspeicher) begrenzt.

Die stufenweise Verfeinerung des DGMs ist etwa bis zu der im obigen Abschnitt 6.3.3.3 diskutierten signifikanten Auflösung grundsätzlich trivial, danach bedarf die Bildzuordnung einer Stabilisierung durch Glattheitsbedingungen oder Photoklinometrie. Beides kann allerdings auch schon von Beginn an eingeführt werden. Da hier Bildzuordnung zuverlässige Höhen liefert, wird sie die DGM-Berechnung bei korrekter Gewichtung der Regularisierung (s.u.) dominieren. Das Grundproblem bei der Anwendung der Photoklinometrie sind fehlerhafte radiometrische Parameter, die im integrierten Ansatz auch aus Überparametrisierung folgen können (vgl. Modellierung der *Nanedi Valles* im Abschnitt 6.3.2). Bei variierenden Reflexionsparametern müssen auch diese in Facetten abgeleitet werden. Die dazu gewählte Facettengröße sollte lokale Unterschiede vollständig erfassen, da sich nicht modellierte Variationen auf die Geometrie auswirken. Dies wird unten im Teilabschnitt 6.7.4 im Zusammenhang mit den Reflexionsmodellen der Mars-Oberfläche diskutiert.

Die Ausgleichsrechnung zur Oberflächenmodellierung liefert neben den Ergebnissen auch eine Reihe von Kenngrößen, anhand derer die Modellverfeinerung beurteilt, gesteuert und schließlich auch beendet werden kann. Die Varianzkomponentenschätzung kann für eine automatisierte Gewichtung zwischen Bildzuordnung, Regularisierung und Photoklinometrie herangezogen werden, wobei Glattheitsbedingungen nach dem Erreichen der signifikanten DGM-Auflösung auf diesem Niveau festgehalten werden sollten (siehe Abschnitt 6.4.2).

6.7.2 Geometrische Ergebnisse

Auf die geometrische Modellierung wird bei allen fünf Bearbeitungsgebieten detailliert eingegangen, da hier die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Oberflächenmodellierung besonders deutlich werden und auch auf vielfältige Weise visualisiert und damit analysiert werden können. Dies zeigt sich insbesondere, wenn die signifikante DGM-Auflösung unterschritten und das DGM durch Bildzuordnung allein nicht mehr zuverlässig bestimmbar ist. In Bezug auf die einzelnen Ansätze können sich dann die folgenden Schwächen offenbaren:

- **Facetten-Stereosehen:** Rauschen und grobe Höhenfehler
- **Regularisierter Ansatz:** Aufschwingen (Überhöhen) und Artefakte durch Fehlzuordnungen
- **Photoklinometrie-Ansatz:** Modellverbiegungen, besonders quer zum Bestrahlungszazimut
- **Integrierter Ansatz:** Modellfehler aufgrund von (radiometrischer) Überparametrisierung

Dabei nehmen Größenordnung und Häufigkeit der im DGM auftretenden Fehler mit der Komplexität der Modellierung ab. Abgesehen von der Reduktion bzw. Elimination grober Fehler können allerdings weder Glattheitsbedingungen noch die Photoklinometrie die absolute Höhengenaugkeit steigern. Die Verbesserung der Detailtreue durch die Modellerweiterungen wird an den praktischen Beispielen innerhalb dieses Kapitels eindeutig nachgewiesen.

Aufgrund der Analysen im Abschnitt 6.3.3.3 können anhand der stochastischen Ergebnisse der Ausgleichung sowohl Maße für die absolute Genauigkeit (aus der Bildzuordnung) als auch für die relative Genauigkeit (aus der Regularisierung bzw. Photoklinometrie) angegeben werden, und zwar individuell für jede DGM-Höhe. Die absolute Genauigkeit zeigt im Mittel (RMS) eine gute Übereinstimmung mit MOLA-Messungen. Allerdings unterliegt die Oberflächenmodellierung einer Vielzahl von Fehlereinflüssen, die sich zufällig aber auch systematisch – wie beispielsweise Kameraorientierung und -kalibrierung –

auswirken und sich im zweiten Fall nicht in der inneren Genauigkeit der Ausgleichung widerspiegeln. Darüber hinaus können die oben angesprochenen Effekte wie das Aufschwingen durch Regularisierung oder Verbiegungen durch die Photoklinometrie ein DGM lokal systematisch verformen. Daher wird in Tabelle 6.18 der Vergleich aller im Rahmen dieser Arbeit bestimmten DGMs mit MOLA-Höhen vorgenommen, welcher die tatsächlich erreichte, äußere Genauigkeit quantifiziert.

Tabelle 6.18: Unabhängiger Vergleich aller DGMs mit der MOLA-Referenz. Angegeben sind: Gebiet und Ansatz, DGM-Auflösung, Anzahl der MOLA-Punkte im Gebiet, mittlere Höhendifferenz zu MOLA, maximale Differenz (Absolutbetrag), RMSE der Differenzen für das gesamte Gebiet und für ebene Teilbereiche (Neigungen unter 5°) sowie die Koppe-Parameter σ_0 (Absolutglied) und σ_G (neigungsabhängiger Faktor).

Ansatz	Auflsg. [m]	MOLA Punkte	Diff. [m]	Max. [m]	RMSE [m]	< 5° [m]	Koppe: σ_0 [m]	Koppe: σ_G [m]
Einschlagkrater								
Regularisierung	80	2 089	-12,1	247,8	30,8	19,5	10,3 ± 0,8	46,4 ± 3,0
Regularisierung	160	107	-11,1	128,5	37,5	15,9	7,8 ± 3,9	62,7 ± 10,4
Talkomplex								
Facetten-Stereosehen	200	132	-34,7	455,0	124,9	35,2	33,4 ± 10,8	128,1 ± 19,5
Regularisierung	100	132	-21,7	90,4	25,9	15,8	11,7 ± 2,5	40,0 ± 10,2
Photoklinometrie	100	132	-13,0	104,5	39,6	35,9	28,6 ± 4,1	2,8 ± 14,2
Integrierter Ansatz	100	132	-30,3	114,9	25,7	28,9	23,6 ± 3,0	-1,5 ± 13,3
Vorgabe Luftlicht	100	132	-30,0	105,6	32,1	28,5	25,0 ± 1,9	2,9 ± 11,5
Kleine Krater								
Regularisierung	50	44	-5,4	76,7	25,5	14,8	9,3 ± 4,6	65,3 ± 28,5
Photoklinometrie	50	44	-6,2	21,0	7,2	7,1	6,3 ± 1,1	-7,7 ± 12,3
Tafelbergland								
Integrierter Ansatz	500	2 066	102,1	241,8	44,9	31,4	27,5 ± 0,9	115,6 ± 10,2
Lavafluss								
Integrierter Ansatz	50	65	-6,1	52,1	15,6	9,2	4,7 ± 2,0	42,0 ± 11,1

Aus der Gegenüberstellung der DGMs der einzelnen Bearbeitungsgebiete und Modellierungsansätze lässt sich Folgendes zusammenfassen:

- Die mittleren **Höhendifferenzen** zu MOLA sind je Gebiet ähnlich, wobei sich am Talkomplex die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Ansätzen, hervorgerufen durch systematische lokale Verbiegungen, zeigen. Die Abweichungen vom Sollwert 0 m sind allerdings weniger auf diese Unterschiede als auf externe systematische Einflüsse (Orientierungsdaten) zurückzuführen, vgl. z.B. Abschnitt 6.5.2 für das Tafelbergland in *Gusev*.
- Die **Streuung (RMSE)** der Differenzen und damit auch deren Maxima steigen erwartungsgemäß mit der DGM-Auflösung an. Eine Ausnahme bildet dabei das Ergebnis aus dem nicht regularisierten Facetten-Stereosehen; hier dominieren Ausreißer.

- Eine aussagekräftigere Quantifizierung wird durch Berücksichtigung der **Neigungsabhängigkeit** der Höhendifferenzen ermöglicht. Dabei wird nochmals deutlich, dass die unterschiedlichen Ansätze eine ähnliche absolute Genauigkeit liefern. Weiterhin zeigt sich, dass der im Abschnitt 6.2.2 für die Genauigkeitsabschätzung von HRSC-DGMs anhand der Koppeschen Formel (5.5) gefundene Faktor von 0,00002 für alle Bearbeitungsgebiete in dieser Größenordnung liegt. Während auch das Verhältnis $\sigma_G:\sigma_0 \approx 5,6$ aus Formel (5.5) grundsätzlich bestätigt wird, führt die Integration mit der Photoklinometrie zu teils nicht signifikant neigungsabhängigen Höhendifferenzen. Hier deutet sich die bessere Detailgenauigkeit im Vergleich zur Regularisierung mit Glattheitsbedingungen an. Dazu ist aber anzumerken, dass diese Statistik teils auf wenigen MOLA-Messungen basiert (vgl. Punktverteilung in den entsprechenden Abbildungen der vorangegangenen Teilabschnitte) und auch MOLA eine stark neigungsabhängige Höhengenaugkeit aufweist.

Über das gesamte, 300 km x 240 km große Testgebiet *Nanedi Valles* – in dem mit dem Einschlagkrater, dem Talkomplex und den kleinen Kratern drei der hier untersuchten, deutlich kleineren Gebiete liegen – weisen die Vergleichsdaten von *DLR-Gwinner*, *DLR-Scholten/UniBwM* sowie auch andere Ergebnisse des *HRSC DTM Tests* mittlere Höhendifferenzen von 2-3 m zu MOLA auf. Die RMSE-Werte betragen 19 m (*DLR-Gwinner*) bzw. 23 m (*DLR-Scholten/UniBwM*) bei 50 m Lageauflösung (vgl. HEIPKE et al. 2007) und sind damit vergleichbar zu den hier erzielten Genauigkeiten. Die in dieser Arbeit vorgestellte Integration von Bildzuordnung und Photoklinometrie kann demgegenüber die Detailtreue der geometrischen Oberflächenmodellierung verbessern.

6.7.3 Atmosphärenparameter

Die mit der Stereomethode berechneten optischen Dichten der Mars-Atmosphäre über allen Bearbeitungsgebieten – auch wenn die optische Dichte für die rein geometrische Modellierung des Kraterrandes nicht berücksichtigt werden muss – sind in Tabelle 6.19 gegenübergestellt. Die Werte liegen zwischen 1,5 und 2,1, d.h. der Hauptteil der von der Oberfläche reflektierten Strahlung wird beim Atmosphärendurchgang gestreut und absorbiert. Dass die Ergebnisse plausibel sind, zeigt der Vergleich mit möglichen zeitlichen Schwankungen (siehe z.B. KAHN et al. 1992 für Daten der *Viking-Lander*) und räumlichen Änderungen der Mars-Atmosphäre. So haben HOEKZEMA et al. (2009) innerhalb eines HRSC-Bildstreifens optische Dichten von > 0 bis etwa 8 bei durchaus hohen Qualitätsfaktoren bestimmt. Die teils geringe Qualität und die damit einhergehenden hohen mittleren Fehler der hier abgeleiteten Werte unterstreichen aber auch, dass die Stereomethode für HRSC-Daten nicht immer zuverlässig ist. Generell sind große Unterschiede in den Beobachtungswinkeln wie beim Tafelbergland im Orbit 684 von Vorteil.

Tabelle 6.19: Atmosphärenparameter der einzelnen Bearbeitungsgebiete.

Gebiet	Max. Winkel θ_r	Optische Dichte τ	Durchlass: $\exp(-\tau)$	Qualität q_τ
Einschlagkrater (Rand)	22,3°	1,78 ± 0,37	0,169 ± 0,063	2,3
Talkomplex	22,1°	1,47 ± 0,06	0,230 ± 0,014	13,7
Kleine Krater	21,7°	2,05 ± 0,29	0,128 ± 0,037	3,5
Tafelberge	31,2°	1,55 ± 0,06	0,212 ± 0,012	123,7
Lavafluss	20,8°	2,11 ± 0,48	0,124 ± 0,060	2,1

Für den Talkomplex, die kleinen Krater und das Tafelbergland erscheinen die optischen Dichten und darauf aufbauend die radiometrischen Modellierungen im Photoklinometrie- bzw. integrierten Ansatz zu-

verlässig. Die in dem Rahmen mitbestimmten Luftlichtanteile ΔR_A sind in Abbildung 6.33 in Abhängigkeit vom Phasenwinkel aufgetragen.

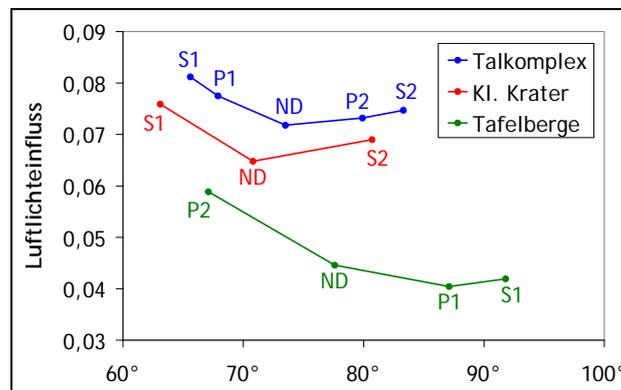


Abbildung 6.33: Phasenwinkelabhängigkeit des Luftlichteinflusses ΔR_A (lineare Interpolation zwischen den Kanälen).

Da die Partikel der Mars-Atmosphäre eine ausgeprägte Vorwärtsstreuung zeigen, nimmt Luftlicht mit dem Phasenwinkel zu. In den hier erfassten, mittleren Bereichen wäre also ein leichter Anstieg zu erwarten – wenn die dargestellten Werte ausschließlich von der Atmosphäre in Richtung des Sensors gestreute Strahlung beschreiben würden. Im Rahmen dieser Arbeit abgeleitete Parameter ΔR_A enthalten aber unter anderem von der Mars-Oberfläche reflektierte und auf dem Weg zum Sensor mehrfach gestreute, diffuse Strahlungsanteile (siehe Abschnitt 3.2), sodass sich in ihnen auch das Reflexionsverhalten der Oberfläche widerspiegelt. Deutlich zu erkennen sind die Einflüsse der am Talkomplex festgestellten leichten Rückstreuung (Abschnitt 6.3.4.3) sowie der ausgeprägten Rückstreuung in den Tafelbergen (Abschnitt 6.5.3.3).

6.7.4 Reflexionsmodelle und Materialeigenschaften der Oberfläche

Wie beispielhaft für zwei der Auswertgebiete demonstriert, können bis zu vier Hapke-Parameter aus den fünf panchromatischen HRSC-Kanälen eines *Mars-Express*-Orbits abgeleitet werden. Der Vergleich mit unabhängigen Modellierungen zeigt, dass die dabei bestimmten Werte plausibel sind und damit Rückschlüsse auf Oberflächenstruktur und Materialeigenschaften erlauben, vgl. ausführliche Analyse für das Bergland in *Gusev* im Abschnitt 6.5.3. Die aus den Ausgleichungen resultierenden Standardabweichungen für das Lunar-Lambert-Modell aus dem integrierten Ansatz und für die darauf aufbauende Hapke-Modellierung erscheinen zu optimistisch, sowohl in Anbetracht der teilweise hohen Korrelationen zwischen den Parametern als auch aufgrund der Sensibilität der radiometrischen Modellierung (hinsichtlich einer Überparametrisierung oder der Trennung von Oberflächen- und Atmosphäreneigenschaften). Die Standardabweichungen spiegeln die innere Genauigkeit der Ausgleichung wider und enthalten insbesondere nicht die Fehlereinflüsse der vorab durchgeführten atmosphärischen Korrektur.

In den hier vorgestellten, kleinen Bearbeitungsgebieten ist es nicht notwendig bzw. für die Hapke-Modellierung in *Gusev* ohne Reduktion der Parameterzahl nicht möglich, die Oberflächenradiometrie in Facetten zu modellieren. Allerdings können auf der Mars-Oberfläche hochfrequente Variationen der Reflexionseigenschaften auch innerhalb kleiner Auswertefenster auftreten. Abbildung 6.34, links, zeigt ein solches, 8,4 km x 8,4 km großes Gebiet aus dem Orbit 987, nördlich des *Gusev*-Kraters. Wenn hier Photoklinometrie angewendet werden soll, ist eine Facettierung der Reflexionsparameter notwendig, um lokale Variationen berücksichtigen zu können. Deren Bestimmung kann jedoch nur anhand zuverlässiger absoluter Höhen, also basierend auf Bildzuordnung, erfolgen. Dass dies prinzipiell möglich ist, zeigt das albedokorrigierte Nadirbild; es ist unter Verwendung einer (gefilterten) Normalalbedo in 29 x 29 Facetten, basierend auf dem DGM des regularisierten Ansatzes, transformiert, sodass lediglich topographiebedingte Schattierungen verbleiben (Gegenüberstellung in Abbildung 6.34). Auf der Grundlage derartig radiome-

trisch korrigierter HRSC-Bilddaten könnte eine Verfeinerung der Modellierung mit dem integrierten Ansatz analog zu der in den Beispielgebieten gezeigten Vorgehensweise erfolgen.

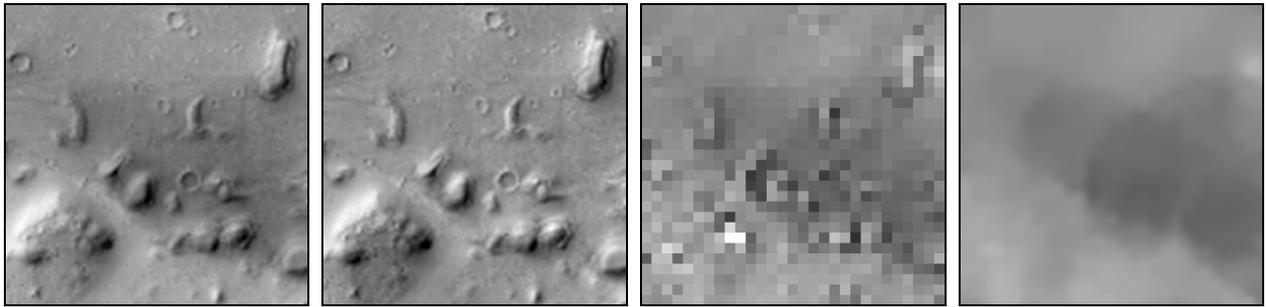


Abbildung 6.34, v.l.n.r.: Orthobild aus dem regularisierten Ansatz mit Albedovariationen, korrigiertes Bild, originale Albedokarte in 29 x 29 Facetten, Albedo nach Median- und Gauß-Filterung.

Die Integration einer derart feinen radiometrischen Facettierung in den integrierten Ansatz ist nicht leicht, wie die angesprochene Gefahr der radiometrischen Überparametrisierung zeigt. Die Albedokarten in Abbildung 6.34 verdeutlichen, dass die abgeleitete Normalalbedo keinesfalls glatt ist, sondern aufgrund von DGM-Artefakten aus dem regularisierten Ansatz Ausreißer zeigt. Bei der Berechnung sollten daher Glattheitsbedingungen ähnlich (4.28) und (4.29) oder (4.30) angesetzt werden. Die Integration in die Oberflächenmodellierung birgt also neue Herausforderungen, bei der je nach Komplexität und Facettierung des verwendeten Reflexionsmodells auch die auf den HRSC-Daten eines einzigen Orbits basierende Auswertung an ihre Grenzen stößt.

6.7.5 Anmerkungen zu den HRSC-Daten

Die HRSC auf *Mars Express* ermöglicht die systematische Aufnahme von fünf panchromatischen Kanälen mit identischen radiometrischen Eigenschaften in unterschiedlichen Stereowinkeln. Dieses Aufnahme-konzept macht die in dieser Arbeit vorgestellte und angewendete Modellierung der Mars-Oberfläche überhaupt erst möglich: Oberflächengeometrie und -radiometrie sowie Atmosphäreneigenschaften können aus einem einzigen Datensatz gemeinsam abgeleitet werden.

Die für die radiometrische (und damit auch für die integrierte geometrische) Modellierung limitierenden Faktoren der HRSC sind die begrenzten Stereowinkel und ihre radiometrische Auflösung von praktisch nur 6-7 Bit bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von > 100 . Dieser Wert wird hier bestätigt.

Neben den panchromatischen bietet die HRSC auch Farbkanäle, sodass beispielsweise Farb-Orthobilder abgeleitet werden können. Dies wäre unter Verwendung der hier berechneten DGMs für die Entzerrung der aus unterschiedlichen Stereowinkeln aufgenommenen Farben ohne weiteres möglich, z.B. zur Ableitung topographischer Bildkarten und für weiterführende Analysen, bringt aber für die Arbeit selbst keinen wissenschaftlichen Gewinn. In die Oberflächenmodellierung können die Farbkanäle nur integriert werden, wenn Daten mehrerer Orbits herangezogen werden und so die zur Bestimmung der spektral-abhängigen Reflexionseigenschaften notwendige Redundanz entsteht. Ein Problem für eine derartige Modellierung stellen allerdings die Veränderungen der Atmosphäre zwischen den Aufnahmen dar, da sich auch diese spektral unterschiedlich auswirken.

6.7.6 Möglichkeiten und Grenzen des Modellierungsansatzes

Die Ableitung von Reflexionseigenschaften in den Beispielgebieten sowie auch die bisherige Diskussion zeigen, dass die Begrenzung der Auswertung auf die fünf panchromatischen HRSC-Kanäle eines Orbits die Möglichkeiten der radiometrischen Modellierung limitiert. Dies ist allerdings keine Schwäche des hier vorgestellten Ansatzes – er liefert die theoretischen Voraussetzungen für eine Berechnung aus mehreren

Orbits –, sondern seiner (bisherigen) Umsetzung. Jedoch ist die Verwendung unterschiedlicher Orbits nicht trivial. Sie bedarf weiterer Forschung und damit einhergehender Modellanpassungen, auch weil einige der hier implizierten Voraussetzungen dann nicht zutreffen. Derartige Annahmen sind:

- Die Oberfläche ändert sich zwischen den Aufnahmen nicht.
- Die Bilddaten weisen keine fundamentalen radiometrischen Unterschiede auf.
- Systematiken in den Orientierungsdaten wirken für alle Bilder gleich.

Die erste Annahme ist eine Grundvoraussetzung der Oberflächenmodellierung, die zweite bezieht sich auf die Bildzuordnung. Hier müssten Alternativen untersucht werden, die robust sind gegenüber den für die Ableitung von Reflexionseigenschaften wünschenswerten radiometrischen Unterschieden, z.B. die Bildzuordnung im Frequenzraum (*phase correlation*). Die Auswirkungen des letztgenannten Punktes werden in dieser Arbeit am Tafelbergland in *Gusev* deutlich. Abhilfe kann die Mitbestimmung der Orientierungsdaten im integrierten Ansatz schaffen.

Neben den obigen Annahmen geht die integrierte Oberflächenmodellierung von den folgenden Voraussetzungen aus:

- Oberflächengeometrie und Material- bzw. Reflexionseigenschaften sind stückweise glatt und durch (Bilinear-)Facetten beschreibbar.
- Die Oberfläche ist eindeutig in Bezug auf das Lageraster.
- Das verwendete Reflexionsmodell parametrisiert die radiometrischen Oberflächeneigenschaften mit ausreichender Genauigkeit.
- Die Oberfläche weist (im Zusammenspiel mit der Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie) eine ausreichende Textur auf.
- Die Bilddaten sind topologisch äquivalent.
- Die Atmosphäre ist über dem Bearbeitungsfenster räumlich und während der HRSC-Aufnahmen eines Orbits zeitlich konstant.

Die erste und zweite Annahme sowie die topologische Äquivalenz sind für den Mars im Auflösungsbereich der HRSC-Daten in der Regel eingehalten (siehe Abschnitte 2.1.2 und 5.2.2). Bei sehr kleinen DGM-Facettengrößen können auch Geländekanten (wo die Regularisierung gering gewichtet wird) gut wiedergegeben werden. Die für die geforderte geometrische und radiometrische Genauigkeit ausreichend facettierte und ausreichend parametrisierte radiometrische Modellbildung erscheint dagegen nicht immer möglich. Wie allerdings die Beispiele dieser Arbeit zeigen, wird das DGM zwar durch die Photoklinometrie auf Basis fehlerhafter radiometrischer Parameter systematisch verfälscht, aber die Detailtreue ist dennoch deutlich besser als sie Bildzuordnung allein liefern kann. In diesem Zusammenhang ist auch die „ausreichende“ Oberflächentextur zu bewerten: Die Bildzuordnung muss theoretisch nur das vertikale Datum definieren, wofür bereits wenig Textur ausreicht. Sollen allerdings im integrierten Ansatz Reflexionsparameter abgeleitet werden, müssen diese durch Bildzuordnung kontrolliert sein und setzen daher gute Textur voraus. Von Vorteil ist eine große Reliefenergie, welche Schattierungen und so Textur mit sich bringt. Die Oberflächenmodellierung kann für ebene Gebiete der Mars-Oberfläche, die von einer einheitlichen Staubschicht bedeckt sind, gänzlich fehlschlagen.

Die Bedeutung der atmosphärischen Modellierung wird im Teilabschnitt 6.7.3 diskutiert. Ist die Bestimmung der optischen Dichte nicht zuverlässig möglich, so können keine Reflexionseigenschaften der Oberfläche abgeleitet werden. Dass der integrierte Ansatz dennoch die Bestimmung plausibler DGMs ermöglichen kann, zeigt die Auswertung am Lavafluss im Abschnitt 6.6.3.

Die tendenziellen Schwächen der einzelnen Ansätze in Bezug auf die (sehr feine) DGM-Modellierung sind im obigen Abschnitt 6.7.2 gegenübergestellt. Ein prinzipielles Problem kann die aufgrund des rechne-

rischen Aufwandes notwendige Beschränkung der Auswertung auf kleine Bearbeitungsfenster darstellen, wenn sich Randeffekte bemerkbar machen. Diese sind je nach Gebiet und Ansatz unterschiedlich stark; DGMs aus dem regularisierten Ansatz neigen zum Aufschwingen.

Wie die Untersuchungen und Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, hängt der Erfolg der Oberflächenmodellierung stark vom Bearbeitungsgebiet und von den Eigenschaften der HRSC-Daten ab. Die Modellierung ist daher nur bedingt automatisierbar und muss anhand der (Zwischen-)Ergebnisse, ihrer stochastischen Eigenschaften und verschiedener Kenngrößen gesteuert und gegebenenfalls neu parametrisiert werden. Dieser Umstand sowie die aktuell vorliegende Implementierung in MATLAB, bei der nicht die zeitliche Optimierung sondern die Möglichkeit zur umfangreichen Analyse im Vordergrund steht, führen dazu, dass das Verfahren derzeit nicht operationell einsetzbar ist.

7 Schlussbemerkungen

Im Rahmen dieser Arbeit wird, basierend auf dem Facetten-Stereosehen, ein Algorithmus zur integrierten geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche aus Bilddaten der HRSC auf *Mars Express* entwickelt. Der Ansatz verknüpft die Bildzuordnung im Objektraum mit der Photoklinometrie, wobei neben der Geometrie auch Atmosphärenparameter und darauf aufbauend das Hapke-Reflexionsmodell und damit Materialeigenschaften der Oberfläche bestimmbar sind. Er bietet somit die Voraussetzungen für eine vollständige Oberflächenbeschreibung unter Berücksichtigung der Zusammenhänge.

Die gezeigten Beispiele belegen das Potential der Methode. Im Vergleich zu Bildzuordnung oder Photoklinometrie, auf deren Basis unterschiedliche Institutionen gegenwärtig HRSC-Daten auswerten, bietet die dargestellte Integration beider Verfahren deutliche Vorteile. Gegenüber der (klassischen) Bildzuordnung sind in Bezug auf die DGM-Qualität zu nennen:

- Das DGM wird – direkt in regelmäßigen Lagefacetten – unter impliziter Berücksichtigung von Nachbarschaftsbeziehungen abgeleitet.
- Durch die Kombination mit der Photoklinometrie werden die Detailgenauigkeit weiter gesteigert und die Bildzuordnung in texturarmen Regionen stabilisiert.

Folgende wesentliche Vorteile bestehen im Vergleich zur allein angewendeten Photoklinometrie:

- Durch die lokale, texturabhängige Gewichtung kann die Photoklinometrie zielgerichtet eingesetzt werden.
- DGM-Artefakte, die aus der Bestrahlung resultieren, werden reduziert.
- Radiometrische Oberflächen- und Atmosphärenparameter können im integrierten Ansatz mitbestimmt werden.

Wie gezeigt, kann das Hapke-Modell mit bis zu vier Parametern – Teilchenalbedo, makroskopische Rauigkeit und Double-Henyey-Greenstein-Phasenfunktion – aus den HRSC-Daten eines *Mars-Express*-Orbits abgeleitet werden.

Während diese bisher einmaligen Bilddaten die integrierte Modellierung der Mars-Oberfläche überhaupt erst ermöglichen, deuten sich gleichzeitig die Grenzen des Ansatzes bei seiner Anwendung auf HRSC an, vor allem in Bezug auf die Radiometrie. Die gemeinsame Auswertung mehrerer Orbits sowie die Einbeziehung der Farbkanäle würden den Datenumfang und damit die Modellierung verbessern; beides bringt neue Herausforderungen. Für die atmosphärische Modellierung, die aus HRSC allein dann nicht (und auch ohne die Farbkanäle nicht immer zuverlässig) lösbar ist, sollten Daten aus anderen Missionen, welche die Atmosphäre aus dem Orbit oder von der Oberfläche aus observieren, untersucht werden.

In Bezug auf die geometrische Modellierung ist es denkbar, die MOLA-Messungen nicht nur als Vergleich heranzuziehen, sondern sie als stochastische Größen mit in die Ausgleichung einzubinden und so die Berechnung zu stabilisieren. Ähnlich gelagert sind die Berücksichtigung geometrischer und radiometrischer Passinformation aus Nachbarfenstern und damit die Mosaikierung, welche für die Auswertung größerer Gebiete notwendig wird. Eine Grundvoraussetzung dafür ist die Optimierung, Vektorisierung und Parallelisierung der Algorithmen.

Die vorgestellten Methoden und theoretischen Überlegungen sowie die verschiedenartigen Ergebnisse der integrierten Oberflächenmodellierung können auch sehr unterschiedlichen Forschungsdisziplinen für ihre weiterführenden Arbeiten dienen. Grundsätzlich bietet sich die in der Datenauswertung bereits ange deutete Umsetzung der Ergebnisse in topographische und thematische Bildkarten an, für die das vom

Autor mitentwickelte kartographische Softwarepaket *Planetary Image Mapper* (PIMap) vorliegt (GEHRKE & NEUKUM 2005, GEHRKE et al. 2006). Dass der Modellierungsansatz neben der Photogrammetrie und Photometrie bereits andere Themenbereiche aus allen Arbeitsgruppen des *HRSC Science Teams* einbezieht, verdeutlicht die breiten Möglichkeiten zur weiteren wissenschaftlichen Analyse. Mit dieser Aussicht bleibt zu hoffen, dass diese Arbeit – entsprechend ihrer eingangs formulierten Zielsetzung – zu einem tiefgreifenden Verständnis der Entstehung und Entwicklung des Mars und damit letztendlich auch zum besseren Verständnis unseres eigenen Planeten beiträgt.

Abkürzungsverzeichnis

AE	Astronomische Einheit = mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne
BRDF	Reflexionsfunktion (<i>bidirectional reflectance distribution function</i>)
CBOE	Kohärente Rückstreuung (<i>coherent backscatter opposition effect</i>)
CCD	<i>charge-coupled device</i>
CIE	Internationale Beleuchtungskommission (<i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>)
CRISM	<i>Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars</i> , auf MRO
ctx	<i>Context Imager</i> , auf MRO (MRO ctx)
DCT	Diskrete Kosinustransformation (<i>discrete cosine transformation</i>)
DGM	Digitales Geländemodell
DIN	<i>Deutsches Institut for Normung</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DN	<i>digital number</i> , (Intensitäts-)Wert eines Bildpixels
DTM	<i>Digital Terrain Model</i> , im Zusammenhang mit dem <i>HRSC DTM Test</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESOC	<i>European Space Operations Center</i>
HG	Henyey-Greenstein-Funktion mit ein (HG1), zwei (HG2) oder drei (HG3) Parametern
HiRISE	<i>High Resolution Imaging Science Experiment</i> , auf MRO
HRSC	<i>High Resolution Stereo Camera</i> , auf <i>Mars Express</i>
HWHW	Halbweite (<i>half width of the half maximum</i>)
IAU	<i>Internationale Astronomische Union (International Astronomical Union)</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> , Programmiersprache und -umgebung
MEGDR	<i>Mission Experiment Gridded Data Records</i> , DGM aus MOLA-Daten
MER	<i>Mars Exploration Rover</i>
MGS	<i>Mars Global Surveyor</i>

MIPL	<i>Multimission Image Processing Laboratory</i> des JPL
MOC	<i>Mars Orbiter Camera</i> , auf MGS
MOLA	<i>Mars Orbiter Laser Altimeter</i> , auf MGS
MRO	<i>Mars Reconnaissance Orbiter</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	Nadirkanal der HRSC
OMEGA	<i>Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité</i> , Spektrometer auf <i>Mars Express</i>
P1, P2	Photometriekanäle 1 und 2 der HRSC
PDS	<i>Planetary Data System</i> der NASA
PEDR	<i>Precision Experiment Data Records</i> (MOLA-Daten)
PIMap	<i>Planetary Image Mapper</i> , kartographisches Softwarepaket zur HRSC-Datenprozessierung
RADF	Bidirektionaler Reflexionsfaktor („ <i>radiance factor</i> “) nach HAPKE (1983, 1991)
RMS	<i>root mean square</i>
RMSE	<i>root mean square error</i>
S1, S2	Stereokanäle 1 und 2 der HRSC
SHOE	Oppositionseffekt (<i>shadow hiding opposition effect</i>)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (<i>signal to noise ratio</i>)
SRC	<i>Super Resolution Channel</i> der HRSC
TES	<i>Thermal Emission Spectrometer</i> , auf MGS
THEMIS	<i>Thermal Emission Imaging System</i> , auf <i>Mars Odyssee</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VICAR	<i>Video Image Communication and Retrieval</i> , Softwaresystem vom MIPL/JPL
WFPC2	<i>Wide Field Planetary Camera 2</i> des <i>Hubble Space Teleskops</i>

Quellenverzeichnis

- ABSHIRE, J. B., SUN, X., AFZAL, R. S., 2000: Mars Orbiter Laser Altimeter: Receiver Model and Performance Analysis. – *Applied Optics*, 39: 2449-2460.
- ALBERTZ, J., 2007: Einführung in die Fernerkundung. – 3. Aufl., 254 S., Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ALBERTZ, J., ATTWENGER, M., GEHRKE, S., et al., 2005: HRSC on Mars Express – Photogrammetric and Cartographic Research. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(10): 1153-1166.
- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., et al., 2004: Digital Cartography with HRSC on Mars Express. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 35(B4): 869-874.
- ALBERTZ, J., NEUKUM, G., 2005: HRSC – Die „High Resolution Stereo Camera“ auf Mars Express. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2005(5): 361-364.
- ALBERTZ, J., SCHOLTEN, F., EBNER, H., et al., 1992: The Camera Experiments HRSC and WAOSS on the Mars-94 Mission. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, 29(B1): 130-137.
- ALBERTZ, J., WIGGENHAGEN, M., 2009: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung / Guide for Photogrammetry and Remote Sensing. – 5. Aufl., 334 S., Wichmann Verlag, Heidelberg.
- ANDERSSOHN, J., 2004: Untersuchungen zur Objektraum basierten Bildrekonstruktion (Facetten-Stereosehen) anhand von Bilddaten der Mars-Oberfläche. – Diplomarbeit, Technische Universität Berlin. Kurzfassung in: *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2004(7): 578-579.
- BARATOUX, D., PINET, P.C., KAYDASH, V.G., et al., 2006: The Derivation of Hapke Parameters Using Multi-Angular Observations from Orbit and Laboratory: An Ill-Posed Inverse Problem. – *Lunar and Planetary Science*, XXXVII, Abstract 1340.
- BARLOW, N.G., 2006: Status Report on the “Catalog of Large Martian Impact Craters”, Version 2.0. – *Lunar and Planetary Science*, XXXVII, Abstract 1337.
- BISCHOFF, C., 2007: Untersuchung von Regularisierungsmethoden für das Facetten-Stereosehen zur Auswertung von HRSC-Daten der Mars-Oberfläche. – Diplomarbeit, Technische Universität Berlin.
- BUGAEVSKY, L.M., KRASNOPEVTSEVA, B.V., SHINGAREVA, K.B., 1996: Zur kartographischen Darstellung irregulärer Himmelskörper. – *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 121(11): 533-541.
- CARR, M.H., GARVIN, J., 2001: Mars Exploration. – *Nature*, 412: 250-253.
- CHANDRASEKHAR, S., 1960: Radiative Transfer. – 1. Aufl., 393 S., Dover Publications, New York.
- CHICARRO, A., MARTIN, P., TRAUTNER, R., 2004: The Mars Express Mission: An Overview. – *ESA Special Publication*, SP-1240.
- CLARK, B.E., HELFENSTEIN, P., BELL, J.F., et al., 2001: NEAR Infrared Spectrometer Photometry of Asteroid 433 Eros. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 155: 189-204.
- CORD, A.M., 2003: Hétérogénéité Optique et Réflectance Spectrale des Surfaces Planétaires Solides: Etudes Expérimentales et Théoriques. – Dissertation, Université Paul Sabatier, Toulouse III, UMR 5562.
- CORD, A.M., PINET, P.C., DAYDOU, Y., et al., 2003: Planetary Regolith Surface Analogs: Optimized Determination of Hapke Parameters Using Multi-Angular Spectro-Imaging Laboratory Data. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 165: 414-427.
- CORD, A.M., PINET, P.C., DAYDOU, Y., et al., 2005: Experimental Determination of the Surface Photometric Contribution in the Spectral Reflectance Deconvolution Processes for a Simulated Martian Crater-like Regolith Target. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 175: 78-91.

- DE GRENIER, M., PINET, P.C., 1995: Near- Opposition Martian Limb-Darkening: Qualification and Implication for Visible-Near-Infrared Bidirectional Reflectance Studies. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 115: 354-368.
- DIEHL, H., HEIPKE, C., 1992: Surface Reconstruction from Data of Digital Line Cameras by Means of Object Based Image Matching. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(B3): 287-294.
- DIN 5031-1, 1982: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 1: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik. – 6 S., Deutsches Institut für Normung/Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 5031-3, 1982: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik. – 11 S., Deutsches Institut für Normung/Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 5036-1, 1978: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien, Teil 1: Begriffe, Kennzahlen. – 8 S., Deutsches Institut für Normung/Beuth Verlag, Berlin.
- DOMINGUE, D.L., CHENG, A.F., 2000: Radiative Transfer Model of Light Scattering from Particulate Surfaces. – *Lunar and Planetary Science*, XXXI, Abstract 1261.
- DORNINGER, P., JANSKA, J., BRIESE, C., 2004: Visualization and Topographical Analysis of the Mars Surface. – *Planetary and Space Science*, 52: 249-257.
- DORRER, E., KIRK, R.L., 2007: H-G-Correction for hwsfs – Description and User's Guide of Interactive Process Prior to hwsfs (Version 1.0). – Teaminternes Dokument (egon.dorrer@unibw-muenchen.de, rkirk@usgs.gov).
- DORRER, E., MAYER, H., HAASE, Y., et al., 2005: Verbesserung räumlicher Daten durch „Shape-from-Shading“. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2005(5): 403-408.
- DUMKE, A., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., et al., 2008: Mars: High-Resolution Digital Terrain Model and Ortho-Image Mosaic on the Basis of MEX/HRSC Data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 37(B4): 1025-1030.
- DUXBURY, T.C., 2002: Analysis of the HRSC Line Array Geometric Calibration Data. – Teaminternes Dokument (tduxbury@jpl.nasa.gov).
- DUXBURY, T.C., KIRK, R.L., ARCHINAL, B.A., NEUMANN, G.A., 2002: Mars Geodesy/Cartography Working Group Recommendations on Mars Cartographic Constants and Coordinate Systems. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 34(B4): 743-748.
- EBNER, H., FRITSCH, D., GILLESSEN, W., et al., 1987: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie. – *Bildmessung und Luftbildwesen*, 55(5): 194-203.
- FAIRBAIRN, M., 2004: Principles of Planetary Photometry. – astrowww.phys.uvic.ca/~tatum.
- FISCHER, B., HEGLAND, M., 1999: Collocation, Filtering and Nonparametric Regression. – *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 124(1): 17-24 (Part I) und 124(2): 46-52 (Part II).
- FRANEK, M., MÜLLER, J., 1990: Regularizing Visible Surface Reconstruction with Facets Stereo Vision (FAST Vision). – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, 28(3/2): 132-143.
- FU Berlin, 2009: MEX/HRSC Team Internal Pages. – (gneukum@zedat.fu-berlin).
- FUA, P., LECLERC, Y.G., 1995: Object-Centered Surface Reconstruction: Combining Multi-Image Stereo and Shading. – *International Journal of Computer Vision*, 16(1): 35-55.
- GASKELL, R.W., 2007: Mapping Small Bodies with Stereophotoclinometry. – *Proceedings ISPRS WG IV/7 Extraterrestrial Mapping Workshop*, Houston.
- GEHRKE, S., 2007: Zur geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten. – *Publikationen der DGPF*, 16: 683-694.

- GEHRKE, S., 2008: Geometric and Radiometric Modeling of the Martian Surface Based on Object Space Matching and Photoclinometry. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 37(B4): 1031-1036.
- GEHRKE, S., BISCHOFF, C., 2007: HRSC Data Processing by Matching in Object Space, II. Effects of Image and DTM Filtering. – *Proceedings ISPRS WG IV/7 Extraterrestrial Mapping Workshop*, Houston.
- GEHRKE, S., HAASE, I., 2006a: Anwendung des Facetten-Stereosehens auf Bilddaten der HRSC auf Mars Express. – *Publikationen der DGPF*, 15: 45-55.
- GEHRKE, S., HAASE, I., 2006b: An Integrated Approach for Orthoimage and DTM Generation Using Mars Express HRSC Data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(B4): 326-332.
- GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., et al., 2006: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche, *Publikationen der DGPF*, 15: 83-88.
- GEHRKE, S., NEUKUM, G., 2005: Das kartographische Softwarepaket Planetary Image Mapper (PIMap). – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2005(5): 417-422.
- GERSHUN, A., 1939: The Light Field (Svetovoe Pole). – *Journal of Mathematics and Physics*, 18: 51-151.
- GREYLEY, R., BATSON, R.M., 1990: *Planetary Mapping*. – Cambridge University Press, Cambridge.
- GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, K.-D., et al., 2008: Archival Stereo Data Products of the HRSC Experiment onboard Mars Express. – *Lunar and Planetary Science*, XXXIX, Abstract 2323.
- GWINNER, K., SCHOLTEN, F., GIESE, B., et al., 2005: Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2005(5): 387-394.
- GWINNER, K., SCHOLTEN, F., JAUMANN, R., et al., 2007: Global Mapping of Mars by Systematic Derivation of Mars Express HRSC High-Resolution Digital Elevation Models and Orthoimages. – *Proceedings ISPRS WG IV/7 Extraterrestrial Mapping Workshop*, Houston.
- HAASE, I., 2007: Anwendung des Facetten-Stereo-Sehens auf Bilddaten der High Resolution Stereo Camera (HRSC) auf Mars Express. – *Diplomarbeit, Technische Universität Berlin*.
- HAASE, Y., 2003: Geometrische Analyse von Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) Spuren als Grundlage für ein verbessertes Geländemodell des Mars. – *Diplomarbeit, Technische Universität Berlin*.
- HAPKE, B.W., 1981: Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 1. Theory. – *Journal of Geophysical Research*, 86 (B4): 3039-3054.
- HAPKE, B.W., 1984: Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 3. Correction for Macroscopic Roughness. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 59: 41-59.
- HAPKE, B.W., 1986: Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 4. The Extinction Coefficient and the Opposition Effect. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 67: 264-280.
- HAPKE, B.W., 1993: *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. – 1. Aufl., 455 S., Cambridge University Press.
- HAPKE, B.W., 2002: Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 5. The Coherent Backscatter Opposition Effect and Anisotropic Scattering. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 157(2): 523-534.
- HAPKE, B.W., 2008: Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 6. Effects of Porosity. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 195(2): 918-926.
- HAPKE, B.W., NELSON, R.M., SMYTHE, W., 1998: The Opposition Effect of the Moon: Coherent Backscatter and Shadow Hiding. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 133: 89-97.
- HAPKE, B.W., SHEPARD, M.K., NELSON, R.M., et al. 2007: Comparison of the Bidirectional Reflectance of a Well-Characterized Powder with Predictions of Models Based on the Equation of Radiative Transfer. – *Lunar and Planetary Science*, XXXVIII, Abstract 1321.

- HAPKE, B., WELLS, E., 1981: Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 2. Experiments and Observations. – *Journal of Geophysical Research*, 86(B4): 3055-3060.
- HARTMAN, B., DOMINGUE, D., 1998: Scattering of Light by Individual Particles and the Implications for Models of Planetary Surfaces. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 131: 421-448.
- HAUBER, E., 2007: HRSC in Comparison. – Unveröffentlicht (ernst.hauber@dlr.de).
- HAUBECKER, H., 1999: Radiation. – In: JÄHNE, B., HAUBECKER, H., GEISLER, P. (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications*, Vol. 1: Sensors and Imaging. – 1. Aufl., 612 S., Academic Press, San Diego/ London: 7-35.
- HEIPKE, C., 1990: Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 366.
- HEIPKE, C., 1992: Integration of Digital Image Matching and Multi Image Shape from Shading. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, 30(B3): 317-323.
- HEIPKE, C., ALBERTZ, J., GEHRKE, S., et al., 2005: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische und kartographische Auswertungen. – *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 130(6): 379-386.
- HEIPKE, C., OBERST, J., GEHRKE, S., et al., 2006: The HRSC DTM Test. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(B4): 311-335.
- HEIPKE, C., OBERST, J., GEHRKE, S., et al., 2007: Evaluating Planetary Digital Terrain Models – The HRSC DTM Test. – *Planetary and Space Science*, 55: 2173-2191.
- HELAVA, U.V., 1988: Object-Space Least-Squares Correlation. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(6): 711-714.
- HELFENSTEIN, P., SHEPARD, M.K., 2003: A Blind Test of Hapke's Photometric Model. – *Lunar and Planetary Science*, XXXIV, Abstract 1968.
- HELFENSTEIN, P., VEVERKA, J., HILLIER, J., 1997: The Lunar Opposition Effect: A Test of Alternative Models. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 128: 2-14.
- HENYEV, L.G., GREENSTEIN, J.L., 1941: Diffuse Radiation in the Galaxy. – *Astrophysical Journal*, 93: 70-87.
- HERKENHOFF, K.E., MURRAY, B.C., 1990: High Resolution Topography and Albedo of South Polar Layered Deposits on Mars. – *Journal of Geophysical Research*, 95(B9): 14511-14529.
- HIRSCHMÜLLER, H., MAYER, H., NEUKUM, G., et al., 2006: Stereo Processing of HRSC Mars Express Images by Semi-Global Matching. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(B4).
- HOEKZEMA, N.M., 2008: Bestimmung der optischen Dichte aus HRSC-Daten anhand der Stereomethode. – Persönliche Kommunikation (hoekzema@mps.mpg.de).
- HOEKZEMA, N.M., 2009: Atmospheric Optical Depth from Stereo Images of HRSC. – *European Planetary Science Letters*, HRSC Special Issue, eingereicht.
- HOEKZEMA, N.M., et al., 2009: Atmospheric Optical Depths from HRSC Stereo Images of the Gusev Area, Mars. – Artikel in Vorbereitung (hoekzema@mps.mpg.de).
- HOEKZEMA, N.M., THOMAS, N., KELLER, H.U., et al., 2007: Optical Depth Retrievals from Shadows in HiRISE Images. – *Seventh International Conference on Mars*, Abstract 3226.
- HÖHLE, J., POTUCKOVA, M., 2006: The EuroSDR Test "Checking and Improving of Digital Terrain Models". – *EuroSDR Official Publication*, 51: 9-55.
- JAUMANN, R., NEUKUM, G., PISCHEL, R., et al., 2007: The High Resolution Stereo Camera (HRSC) Experiment on Mars Express: Instrument Aspects from Interplanetary Cruise through Nominal Mission. – *Planetary and Space Science*, 55: 928-952.
- JEHL, A., 2007: Radiometrische Modellierung im Bereich des Gusev-Kraters. – Persönliche Kommunikation (jehl@ntp.obs-mip.fr).

- JEHL, A., PINET, P.C., BARATOUX, D., et al., 2008: Gusev Photometric Variability as Seen from the Orbit by HRSC/Mars Express. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 197(2): 403-428.
- JEHL, A., PINET, P.C., CORD, A., et al., 2006: Improved Surface Photometric Mapping across Gusev and Apollinaris from an HRSC/Mars Express Integrated Multi-Orbit Dataset: Implication on Hapke Parameters Determination. – *Lunar and Planetary Science*, XXXVII, Abstract 1219.
- JOHNSON, J.R., BELL, J.F., GEISSLER, P., et al., 2008: Physical Properties of the Martian Surface from Spectrophotometric Observations. – In: BELL, J. (Hrsg.): *The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties*. – 652 S., Cambridge University Press, New York: 428-450.
- JOHNSON, J.R., GRUNDY, W.M., LEMMON, M.T., 2006: Spectrophotometric Properties of Materials Observed by Pancam on the Mars Exploration Rovers: 1. Spirit. – *Journal of Geophysical Research*, 111, E02S14, doi: 10.1029/2005JE002494.
- JUDD, D.B., 1967: Terms, Definitions, and Symbols in Reflectometry. – *Journal of the Optical Society of America*, 57(4): 445-452.
- KAHN, R.A., MARTIN, T.Z., ZUREK, R.W., 1992: The Martian Dust Cycle. – In: KIEFFER, H.H., JAKOSKY, B.M., SNYDER, C.W., MATTHEWS, M.S. (Hrsg.): *Mars*. – 1498 S., University of Arizona Press, Tucson: 799-817.
- KAREL, W., KRAUS, K., 2006: Quality Parameters of Digital Terrain Models. – *EuroSDR Official Publication*, 51: 125-139.
- KIEFFER, H.H., JAKOSKY, B.M., SNYDER, C.W., 1992: The Planet Mars: From Antiquity to the Present. – In: KIEFFER, H.H., JAKOSKY, B.M., SNYDER, C.W., MATTHEWS, M.S. (Hrsg.): *Mars*. – 1498 S., University of Arizona Press, Tucson: 1-33.
- KIRK, R.L., 1987: Part III: A Fast Finite-Element Algorithm for Two-Dimensional Photoclinometry. – *Dissertation*, California Institute of Technology, Pasadena: 165-258.
- KIRK, R.L., 2005: Grids & Datums – Mars. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(10): 1111-1126.
- KIRK, R.L., BARRET, J.M., SONDERBLOM, L.A., 2003: Photoclinometry made simple...? – *Proceedings ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop: Advances in Planetary Mapping*, Houston.
- KIRK, R.L., HOWINGTON-KRAUS, E., GALUSZKA, D., et al., 2006: Topomapping of Mars with HRSC Images, ISIS, and a Commercial Stereo Workstation. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(B4).
- KIRK, R.L., HOWINGTON-KRAUS, E., SONDERBLOM, L.A., et al., 2004: Comparison of USGS and DLR Topographic Models of Comet Borrelly and Photometric Applications. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 167: 54-69.
- KRAUS, K., 2004: *Photogrammetrie, Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. – 7. Aufl., 397 S., Walter de Gruyter, Berlin.
- KRAUS, K., SCHNEIDER, W., 1988: *Fernerkundung, Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. – 1. Aufl., 291 S., Dümmler Verlag, Bonn.
- KUCHLING, H., 2004: *Taschenbuch der Physik*. – 18. Aufl., 712 S., Fachbuchverlag, Leipzig.
- LEDERER, S.M., DOMINGUE, D.L., VILAS, F., et al., 2005: Physical Characteristics of Hayabusa Target Asteroid 25143 Itokawa. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 173: 153-165.
- LESTER, T.P., MCCALL, M.L., TATUM, J.B., 1979: Theory of Planetary Photometry. – *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 73(5): 233-257.
- LINKE, M., 2004: *Vergleich von Verfahren zur Bestimmung des Regularisierungsparameters*. – *Diplomarbeit*, Technische Universität Berlin.
- LOHSE, V., HEIPKE, C., KIRK, R.L., 2006: Derivation of Planetary Topography Using Multi-Image Shape-from-Shading. – *Planetary and Space Science*, 54: 661-674.

- MARKIEWICZ, W. J., HOEKZEMA, N. M., KELLER, H.U., et al., 2004: Atmospheric Optical Depths from HRSC Stereo Images. – Poster, European Geosciences Union (EGU) 1st General Assembly, Nizza.
- MARKIEWICZ, W.J., PETROVA, E.V., HOEKZEMA, N.M., et al., 2005: The Retrieval of Atmospheric Optical Depth and Surface Albedo of Mars from the Brightness of Surface Shadows in the HRSC Images. – Geophysical Research Abstracts, 7 (EGU05-A-05193).
- MARTONCHIK, J.V., BRUEGGE, C.J., STRAHLER, A.H., 2000: A Review of Reflectance Nomenclature Used in Remote Sensing. – Remote Sensing Reviews, 19: 9-20.
- MARTONCHIK, J.V., DINER, D.J., PINTY, B., 1998: Determination of Land and Ocean Reflective, Radiative, and Biophysical Properties Using Multiangle Imaging. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4): 1266-1281.
- MCEWEN, A.S., 1986: Exogenic and Endogenic Albedo and Color Patterns on Europa. – Journal of Geophysical Research, 91(B8): 8077-8097.
- MCEWEN, A.S., 1991: Photometric Functions for Photoclinometry and Other Applications. – International Journal of Solar System Studies (ICARUS), 92: 298-311.
- MCGUIRE, A.F., HAPKE B.W., 1995: An Experimental Study of Light Scattering by Large, Irregular Particles. – International Journal of Solar System Studies (ICARUS), 113: 134-155
- MINNAERT, M., 1941: The Reciprocity Principle in Lunar Photometry. – Astrophysical Journal, 93: 403-410.
- MIPL, 2009: Multimission Image Processing Laboratory: The VICAR Image Processing System. – www-mipl.jpl.nasa.gov.
- NASA PDS, 2009: Mars Global Surveyor: MOLA. – pds-geosciences.wustl.edu/missions/mgs/mola.html.
- NEUKUM, G., CARSENTY, U., EICHENTOPF, K., et al., 1996: The Experiments HRSC and WAOSS on the Russian Mars 94/96 Missions. – Acta Astronautica, 38(9): 713-720.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R., and the HRSC Co-Investigator and Experiment Team, 2004: HRSC – The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. – ESA Special Publication, SP-1240.
- NICODEMUS, F.E., 1965: Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. Applied Optics, 4 (7): 767-773.
- NICODEMUS, F.E., 1970: Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity. – Applied Optics, 9(6): 1474-1475.
- NICODEMUS, F.E., RICHMOND, J.C., HSIA, J.J., et al., 1977: Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. – NBS Monograph 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Washington.
- NIEMEIER, W., 2002: Ausgleichungsrechnung. – 1. Aufl., 407 S., Walter de Gruyter, Berlin/New York.
- OBERST, J., SCHWARZ, G., BEHNKE, T., et al., 2008: The Imaging Performance of the SRC on Mars Express. – Planetary and Space Science, 56(3-4): 473-491.
- OWEN, T., 1992: The Composition and Early History of the Martian Atmosphere. – In: KIEFFER, H.H., JAKOSKY, B.M., SNYDER, C.W., MATTHEWS, M.S. (Hrsg.): Mars. – 1498 S., University of Arizona Press, Tucson: 818-834.
- PATERAKI, M., BALTSAVIAS, E., 2002: Adaptive Multi-Image Matching Algorithm for the Airborne Digital Sensor ADS40. – Proceedings Asian Conference on GIS, GPS, Aerial Photography, and Remote Sensing (Map Asia), Bangkok.
- PIECHULLEK, C., 2000: Oberflächenrekonstruktion mit Hilfe einer Mehrbild-Shape-from-Shading-Methode. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 518.
- PINET, P.C., CORD, A.M., JEHL, A., et al., 2005: Mars Express Imaging Photometry and Surface Geologic Processes at Mars: What Can be Monitored within Gusev Crater? – Lunar and Planetary Science, XXXVI, Abstract 1721.

- PINET, P.C., JEHL, A., CORD, A.M., et al., 2006: Mars Express/HRSC Imaging Photometry and MER Spirit/Pancam in situ Spectrophotometry within Gusev.
- RAHMAN, H., PINTY, B., VERSTRAETE, M.M., 1993: Coupled Surface-Atmosphere Reflectance (CSAR) Model: 2. Semiempirical Surface Model Usable with NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data. – *Journal of Geophysical Research*, 98(D11): 20791-20801.
- REBHAN, H., 1993: Richtungsabhängige Reflexionseigenschaften der lunaren Oberfläche. – Dissertation, DLR-Forschungsbericht 93-28.
- SAMARAS, D., METAXAS, D., FUA, P., LECLERC, Y.G., 2000: Variable Albedo Surface Reconstruction from Stereo and Shape from Shading. – *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*: 480-487.
- SCHAEPMAN-STRUB, G., PAINTER, T., HUBER, S., 2004: About the Importance of the Definition of Reflectance Quantities – Results of Case Studies. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 35(B1): 361-366.
- SCHLÜTER, M., 1999: Von der 2½D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 506.
- SCHLÜTER, M., 2000: Das Facetten-Stereosehen und die neue Generation digitaler Luftbildkameras. – Festschrift zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.P. WROBEL, Schriftenreihe der Fachrichtung Vermessungswesen der TU Darmstadt: 215-222.
- SCHMIDT, R., 2008: Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten für HRSC-Bilder der Mars-Express-Mission. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 623. Identisch mit: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 275.
- SCHMIDT, R., HEIPKE, C., BRAND, R., et al., 2005: Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2005(5): 373-379.
- SCHMIDT, R., HEIPKE, C., NEUKUM, G., et al., 2006: Improving Tie Point Extraction by Anisotropic Diffusion. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(B4): 352-357.
- SCHMIDT, R., NEUKUM, G., 2007: Restoration of Degraded Planetary Imagery. – *Proceedings ISPRS WG IV/7 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston*.
- SCHNEIDER, C.-T., 1991: Objektgestützte Mehrbildzuordnung. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 375.
- SCHOLTEN, F., ROATSCH, T., GWINNER, K., et al., 2005: Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC Daten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2005(5): 365-372.
- SCHULTZ, 2001: Planetologie – Eine Einführung. – 270 S., Bechtermünz-Verlag (Lizenzausgabe).
- SEELOS, F.P., ARVIDSON, R.E., GUINNES, E.A., et al., 2005: Radiative Transfer Photometric Analyses at the Mars Exploration Rover Landing Sites. – *Lunar and Planetary Science, XXXVI*, Abstract 2054.
- SEIDELMANN, P.K., ABALAKIN, V.K., BURSA, M., et al., 2002: Report of the IAU/IUG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites: 2000. – *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 82(1): 83-111.
- SHEPARD, M.K., CAMPBELL, B.A., 1998: Shadows on a Planetary Surface and Implications for Photometric Roughness. – *International Journal of Solar System Studies (ICARUS)*, 134: 279-291.
- SHEPARD, M.K., HELFENSTEIN, P., 2007: A Test of the Hapke Photometric Model. – *Journal of Geophysical Research*, 112, E03001, doi: 10.1029/2005JE002625.

- SHKURATOV, Y.G., STANKEVICH, D.G., PETROV, D.V., et al., 2005: Interpreting Photometry of Regolith-like Surfaces with Different Topographies: Shadowing and Multiple Scattering. – International Journal of Solar System Studies (ICARUS), 173: 3-15.
- SIEVERS, J., 1976: Zusammenhänge zwischen Objektreflexion und Bildschwärzung in Luftbildern. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 221.
- SMITH, D.E., ZUBER, M.T., FREY, H.V., et al., 2001: Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment Summary after the first Year of Global Mapping of Mars. – Journal of Geophysical Research, 106(E10): 23689-23722.
- SMITH, D.E., ZUBER, M.T., SOLOMON, S.C., et al., 1999: The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution. – Science, 284: 1495-1503.
- SODERBLOM, J.M., BELL, J.F., HUBBARD, M.Y.H., WOLFF, M.J., 2006a: Martian Phase Function: Modeling the Visible to Near-Infrared Surface Photometric Function Using HST-WFPC2 Data. – International Journal of Solar System Studies (ICARUS), 184: 401-423.
- SODERBLOM, J.M., BELL, J.F., JOHNSON, J.R., et al., 2006b: Photometry of the Martian Surface Using Data from the Navigation Cameras on the Mars Exploration Rovers Spirit and Opportunity. – Lunar and Planetary Science, XXXVII, Abstract 1935.
- SPIEGEL, M., 2007a: Kombinierte Ausgleichung der Mars Express HRSC Zeilenbilddaten und des Mars Global Surveyor MOLA DGM. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 610.
- SPIEGEL, M., 2007b: Zur Ausgleichung von HRSC-Orientierungsdaten. – Persönliche Kommunikation.
- SPIEGEL, M., STILLA, U., GIESE, B., et al., 2005: Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformation. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 2005(5): 381-386.
- STANZEL, C., PÄTZOLD, M., GREELEY, R., et al., 2006: Dust Devils on Mars observed by the High Resolution Stereo Camera. – Geophysical Research Letters, 3311: 202.
- TSAY, J.R., 1996: Wavelets für das Facetten-Stereosehen. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 454.
- University of Arizona, 2009: High Resolution Imaging Science Experiment. – hirise.lpl.arizona.edu.
- VEVERKA, J., THOMAS, P., JOHNSON, T.V., et al., 1986: The Physical Characteristics of Satellite Surfaces. – In: BURNS, J.A., MATTHEWS, M.S. (Hrsg.): Satellites. – University of Arizona Press, Tucson: 342-402.
- WEISENSEE, M., 1988: Models of Light Reflection for Facet Stereo Vision. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), 27(B3/B10): 360-367.
- WEISENSEE, M., 1992: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 374.
- WENDT, A., 2002: Gemeinsame Ausgleichung von Laserscannerdaten und digitalen photogrammetrischen Bildern. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 2002(2): 103-110.
- WIMAN, H., 1998: Automatic Generation of Digital Surface Models through Matching in Object Space. – Photogrammetric Record, 16(91): 83-91.
- WROBEL, B.P., 1987a: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. – Bildmessung und Luftbildwesen, 55(3): 93-101.
- WROBEL, B.P., 1987b: Einige Überlegungen über die theoretischen Grundlagen der digitalen Photogrammetrie. – Bildmessung und Luftbildwesen, 55(4): 129-140.
- WROBEL, B.P., 1989: Geometrisch-physikalische Grundlagen der digitalen Bildmessung. – Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart (SIPUS), 13: 325-333.
- WROBEL, B.P., KAISER, B., HAUSLADEN, J., 1992: Adaptive Surface Regularization – A New Method for Stabilization of Surface Reconstruction from Images. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), 29(B3): 824-831.

-
- ZHANG, R., PING-SING, T., CRYER, J.E., SHAH, M., 1999: Shape from Shading: A Survey. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(8): 690-706.
- ZUREK, R.W., 1992: Comparative Aspects of the Climate on Mars: An Introduction to the Current Atmosphere. - In: KIEFFER, H.H., JAKOSKY, B.M., SNYDER, C.W., MATTHEWS, M.S. (Hrsg.): Mars. - 1498 S., University of Arizona Press, Tucson: 799-817.

Nachwort

Nach Ablauf des Projekts zur kartographischen Verarbeitung von HRSC-Bilddaten verließ ich im August 2007 das Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin. Ein Ergebnis der sechsjährigen Forschungsarbeiten waren vielbeachtete topographische und thematische Bildkarten der Mars-Oberfläche – jedoch keine fertige Dissertation. Allerdings waren die Entwicklungen und Berechnungen weitgehend abgeschlossen, sodass die wesentlichen Ergebnisse und auch ein Großteil der schriftlichen Ausarbeitung vorlagen. Daher habe ich immer daran geglaubt, dass ich meine Arbeit trotz neuer Herausforderungen fertig stelle, und ich möchte allen danken, die mich dabei auf sehr unterschiedliche Weise unterstützt haben.

Die Idee, Digitale Geländemodelle und Reflexionseigenschaften der Mars-Oberfläche gemeinsam aus den Daten der HRSC abzuleiten, stammt von Prof. JÖRG ALBERTZ. Er hat mich in enger Zusammenarbeit gefördert und gefordert; ich konnte viel von ihm lernen. Über seine Rolle als Doktorvater hinaus ist er mir seither auch freundschaftlich verbunden.

Danken möchte ich auch den beiden anderen Gutachtern, Prof. JÜRGEN OBERST und Prof. CHRISTIAN HEIPKE, sowie RANDOLPH L. KIRK für ihre Ideen und Anregungen. Viele weitere Kollegen des *HRSC Science Teams* unter der Leitung von Prof. GERHARD NEUKUM haben durch die Bereitstellung bzw. Aufbereitung von Daten der HRSC und anderer Missionen sowie ihrer Forschungsergebnisse zum Erfolg der Arbeit beigetragen. „Meine“ Diplomanden, JAN ANDERSSOHN, ISABEL HAASE und CHRISTIAN BISCHOFF, haben mit großem Einsatz Grundlagen und Teilaspekte des Auswertansatzes untersucht. In dem Zusammenhang möchte ich auch den Mitarbeitern des Instituts für Geodäsie und Geoinformationstechnik danken, vor allem den im Mars-Projekt beschäftigten Studenten BERT WOLF, ROBERT KÖHRING und DAVID BORNEMANN. Für die Korrekturarbeiten konnte ich mich auf die Fachkenntnisse von ANDY MEYER, JANET HEUWOLD und MARTIN ORLOB verlassen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht – allen voran bei meiner Lebensgefährtin, ALEXANDRA SOBKE, die mir besonders in der Schlussphase den Rücken von nahezu allem anderen freigehalten hat. Ohne sie hätte ich die Promotion sicherlich nicht erreicht. Meiner Tochter, ANNI LUISE, danke ich dafür, dass sie mich zuweilen dem Computer entrissen hat, sodass ich schließlich mit neuen Kräften und Ideen die Arbeit zu Ende führen konnte. Insbesondere für euch zwei habe ich nun wieder etwas mehr Zeit.

Calgary, im April 2009

STEPHAN GEHRKE