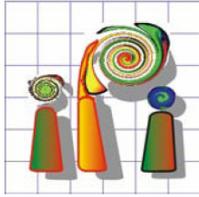


HCU

HafenCity Universität
Hamburg



*Institut für Photogrammetrie und GeoInformation
Universität Hannover*

Diplomarbeit

Generierung von Digitalen Geländemodellen mittels
Multi-Image Shape-from-Shading Verfahren aus
Mars Express HRSC-Daten



vorgelegt von

Stephen Rump

Geprüft durch: Prof. Dipl.-Ing. Thomas Kersten (HCU Hamburg)
Dipl.-Ing. Ralph Schmidt (Universität Hannover)

Juni 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	- 1 -
2	Die Mars Express Mission	- 2 -
2.1	Der Mars	- 5 -
2.2	Bezugssysteme auf dem Mars.....	- 6 -
2.3	High Resolution Stereo Camera (HRSC).....	- 7 -
2.3.1	Innere Orientierung	- 11 -
2.3.2	Äußere Orientierung	- 16 -
3	Grundlagen	- 18 -
3.1	Transformationen.....	- 18 -
3.1.1	Transformation von Objektkoordinaten in Pixelkoordinaten....	- 18 -
3.1.1.1	Erweiterte Kollinearitätsgleichung und Ableitung nach den Höhen.....	- 18 -
3.1.1.2	Vorstellung der Transformationsmethode.....	- 21 -
3.1.1.3	Pixelkoordinaten in Bildkoordinaten.....	- 22 -
3.1.1.4	Bildkoordinaten in Pixelkoordinaten und Ableitung nach x' und y'	- 23 -
3.1.2	Planetographische Koordinaten in planeozentrisch-kartesische Koordinaten	- 26 -
3.1.3	Planetozentrisch-kartesische Koordinaten in lokales Tangentialsystem.....	- 26 -
3.1.4	Transformation der Orientierungswinkel durch Komponentenvergleich	- 27 -
3.2	Resampling	- 28 -
3.3	Multi-Image Shape-from-Shading (MI-SFS).....	- 29 -
3.3.1	Bildentstehung	- 30 -
3.3.2	Die Albedo	- 31 -
3.3.3	Reflexionsmodelle	- 33 -
3.3.3.1	Lambert-Gesetz.....	- 33 -
3.3.3.2	Lommel-Seeliger-Gesetz.....	- 34 -
3.3.3.3	Lunar-Lambert-Gesetz	- 35 -
3.3.4	Kameragleichung	- 36 -

3.3.5	Geometrisches Oberflächenmodell.....	- 37 -
3.3.6	Radiometrisches Oberflächenmodell	- 39 -
3.3.7	Ausgleichungsansatz.....	- 40 -
4	Implementierung der Zeilenbildgeometrie in das	
	Programm „MI-SFS“	- 44 -
4.1	Ausgangsprogramm und Programmerweiterung	- 44 -
4.2	Eingabedaten.....	- 45 -
4.2.1	HRSC Bildstreifen	- 45 -
4.2.2	Extori-Files	- 46 -
4.2.3	Näherungs- und Referenz-DGM	- 47 -
4.2.4	Kalibrierungsdaten des Sensors	- 47 -
4.2.5	Weitere Eingabeparameter	- 48 -
4.2.6	Parameterübergabe.....	- 49 -
4.3	Ausgabedaten.....	- 50 -
4.4	Programmaufbau	- 50 -
4.5	Wichtige Programmerweiterungen.....	- 52 -
4.5.1	VICAR-Funktionen	- 52 -
4.5.2	Funktion MEX-DGMEinlesen().....	- 52 -
4.5.3	Funktion MEX_SetSunPos()	- 53 -
4.5.4	Funktion SubImage()	- 54 -
4.5.5	Funktion kh_ColliMc2Ic()	- 54 -
4.5.6	Funktion MEX_AbleitungBild().....	- 55 -
5	Auswertung.....	- 56 -
5.1	Einbildauswertung	- 66 -
5.2	Mehrbildauswertung.....	- 70 -
6	Schlussbetrachtung und Ausblick.....	- 77 -
7	Literaturverzeichnis	- 80 -

1 Aufgabenstellung

Diplomarbetsaufgabe für Herrn Stephen Rump

(Student der HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik)

Die HRSC (Hight Resolution Stereo Camera) an Bord der europäischen Marsmission Mars-Express liefert seit Januar 2004 hochauflösende, stereoskopische und farbige Bilddaten. Mit diesem Bildmaterial sollen u.a. zur Kartenerstellung Orthophotos generiert werden. Grundlage zur Erstellung eines Orthophotos ist ein DGM (Digitales GeländeModell), welches aus den HRSC- oder MOLA- (Mars Observer Laser Altimeter) Daten gewonnen werden kann.

Das Institut für Planetenforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Berlin Adlershof prozessiert die Bilddaten der HRSC. Neben einer radiometrischen Korrektur werden DGMs und Orthophotos mit Hilfe automatisierter Batch-Skripte generiert. Das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover ist in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung (FPF) der TU München an der Prozessierung beteiligt. Am IPI werden mit Hilfe digitaler Bildzuordnung (Matching) automatisch Verknüpfungspunkte erzeugt, mit denen am FPF eine Bündelausgleichung zur Verbesserung der äußeren Orientierung bzw. Anpassung an MOLA der HRSC gerechnet wird.

Planetare Bilddaten enthalten häufig keine ausreichende Textur, um mittels Matching Verfahren lückenlose hochauflösende DGMs zu erstellen. Dies trifft auch auf die Bilddaten der HRSC auf Mars Express zu. Dahingegen benötigen Shape-from-Shading (SFS) Verfahren möglichst texturlose Oberflächen, und sind somit in der Lage, die herkömmlichen Bildzuordnungsverfahren zu ergänzen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll ein bestehendes Shape-from-Shading Programm um die Dreizeilengeometrie der HRSC erweitert werden. Anhand von Mars Express Testdatensätzen soll dieses Verfahren evaluiert werden. Für die Lösung der Aufgabe werden Programmierkenntnisse in C/C++ benötigt.

Ausgabetermin: 20.04.2006

Dipl.-Ing Ralph Schmidt

2 Die Mars Express Mission

Die Mars Express Mission der European Space Agency (ESA) ist nicht nur die erste europäische Mission zum Mars, sondern auch die erste europäische Mission zu einem Planeten unseres Sonnensystems überhaupt. Der Erfolg der Mars Express Mission ist zudem so bedeutend, weil die Geschichte der Marserkundung durch gescheiterte Missionen und Misserfolge geprägt ist. Eine Auswahl wichtiger und erfolgreicher Marsmissionen der NASA (National Aeronautics and Space Administration) und ESA zeigt die Tabelle 2.1. Darüber hinaus gibt sie Auskunft über die photogrammetrisch nutzbare Ausstattung der Sonden, sowie zusätzlich wichtige Eigenschaften (NASA, 2006 und ESA, 2006a). Bemerkenswert ist, dass es zwischen „Viking 1 + 2“ und „Mars Global Surveyor“ (MGS) 20 Jahre lang keine erfolgreiche Marsmission gab und erst Ende der 90er Jahre die Erkundung fortgeführt werden konnte.

Mission	Jahr	Kameraausstattung	Bemerkung
Mariner 4	1964	Kamera mit digitalem Bandrecorder	Vorbeiflug: Zum ersten Mal 22 Nahaufnahmen des Mars
Mariner 6 + 7	1969	Kameras mit digitalem Bandrecorder + Infrarot-Spektrometer	Vorbeiflug: Analyse der Atmosphäre und Oberfläche (200 Bilder)
Mariner 9	1971	Kamera mit digitalem Bandrecorder + Infrarot- und Ultraviolett-Spektrometer	Erstes Mal in Umlaufbahn: Bilder von 97% der Marsoberfläche !
Viking 1 + 2	1975	Farbkameras	Landegeräte
Mars Global Surveyor	1996	Hochauflösende Kameras + Wärmestrahlen-Spektrometer	Sehr niedrige Umlaufbahn !
Mars Pathfinder	1997	Farbkameras	Lander und Rover
Mars Odyssey	2001		Sucht Wasser
Spirit + Opportunity	2003	Farbkameras	Zwei baugleiche Rover
Mars Express	2003	HRSC / SRC	Hochauflösende Farbstereobilder !

Tabelle 2.1 Wichtige Marsmissionen der letzten 50 Jahre

Die mit einem roten Ausrufezeichen gekennzeichneten Missionen markieren Projekte, die eine globale photogrammetrische Aufnahme zum Ziel hatten und somit wichtige Schritte bei der systematischen, flächendeckenden Erfassung

des Planeten bezeichnen. Darüber hinaus liefern die zeitlich zurückliegenden Missionen Grundlagedaten, die bei aktuellen Projekten unverzichtbar sind.

Die Mars Express Mission ist, wie die Tabelle zeigt, nicht die erste Mission mit dem Ziel, die Oberfläche des Mars photogrammetrisch aufzunehmen. Jedoch ist diese Sonde mit einer Zeilenbildkamera (siehe Kapitel 2.3) ausgestattet. Dadurch ist sie für die Stereobildauswertung prädestiniert. Zudem unterscheidet sich die europäische Mission von früheren Missionen dahingehend, dass eine flächendeckende Aufnahme der gesamten Marsoberfläche mit hochauflösenden Multispektralbildern durchgeführt werden soll.

Mars Express startete im Juni 2003 vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan mit einer Rakete vom Typ Soyuz Fregat. Der Zeitraum war deshalb günstig, weil Mars und Erde sich in einem sehr geringen Abstand passierten und somit die Transferzeit der Sonde sehr kurz war. Die Abbildung 2.1 zeigt die Mars-Opposition am 27. August, dem Datum, an dem sich die beiden Planeten am nächsten standen (etwa 56 Mio. Kilometer). Eine ähnliche Konstellation würde sich erst wieder 2019 ergeben. Mit der günstigen Konstellation bestand auch die Möglichkeit, den Orbiter mit einer maximalen Zuladung von 1120kg zu starten. Auf die Landeeinheit „Beagle 2“ musste deshalb nicht verzichtet werden. Allerdings konnte seit dem Eintritt des Landers in die Marsatmosphäre kein Signal empfangen werden und so gilt er seitdem als verschollen.

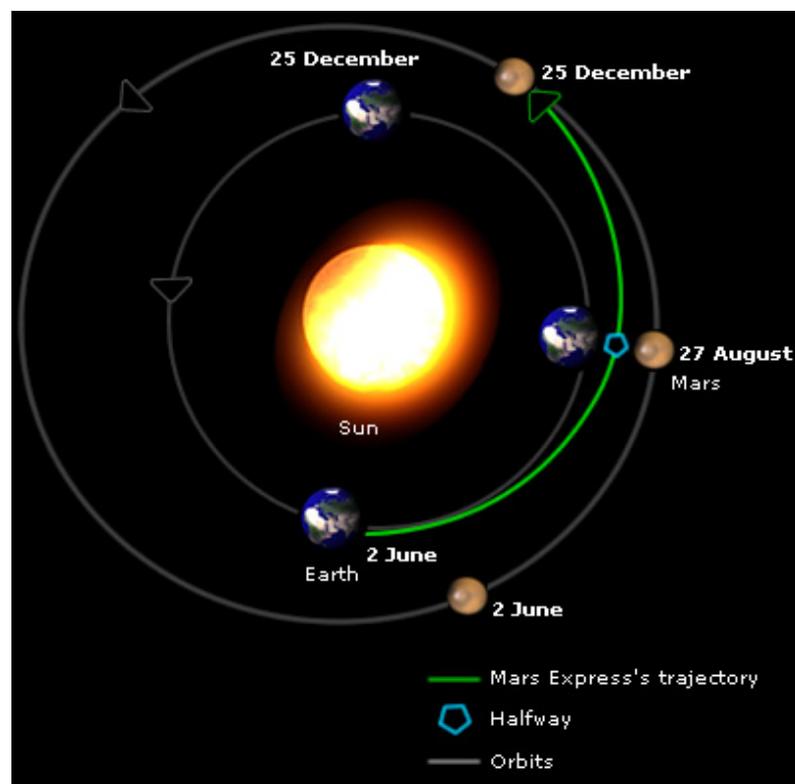


Abbildung 2.1 Mars-Opposition 2003

Der Orbiter erreichte den Mars am 25. Dezember 2003 und schwenkte in eine polnahe Umlaufbahn mit einer Inklination von 86° ein. Die Orbitbahn ist stark elliptisch mit einer kleinen und großen Halbachse von 259x11560km. Ein Planetenumlauf dauert 7,5 Stunden. Die Operationszeit der Instrumente auf Mars Express wurde zu Missionsbeginn mit einem Marsjahr (entspricht zwei Erdenjahren) festgelegt. Im Dezember 2005 bestätigte sich die Annahme, dass die Sonde fehlerfrei auch noch ein zweites Marsjahr Daten sammeln kann.

Die Instrumente im Orbiter nahmen nach einer Testphase wie geplant ihren Dienst auf. Das Sensor-Equipment besteht aus (Chicarro et al., 2004):

Instrumentenbezeichnung		Bemerkung
High Resolution Stereo Camera	HRSC	Zeichnet die Marsoberfläche mit neun hochauflösenden Stereo- und Multispektralkanälen auf
Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer	OMEGA	Ermittelt die mineralogische Zusammensetzung der Marsoberfläche
Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer	SPICAM	Ermittelt die Zusammensetzung der Atmosphäre (Ozon, Wasser)
Planetary Fourier Spectrometer	PFS	Ermittelt Druck und Temperatur in der Atmosphäre
Energetic Neutral Atoms Analyser	ASPERA	Misst die Anzahl von Sauerstoff- und Wasserstoffatomen in der äußeren Atmosphäre
Mars Radio Science Experiment	MaRS	Nutzt die Funksignale zwischen Sonde und Erde zur Erforschung der Ionosphäre, Atmosphäre sowie der Marsoberfläche
Sub-Surface Sounding Radar Altimeter	MARSIS	Kartiert die Strukturen unter der Marsoberfläche bis zu einer Tiefe von mehreren Kilometern

Tabelle 2.2 Wissenschaftliche Instrumente auf Mars Express

Die Sonde übermittelt ihre Daten an die ESA Bodenstationen in Madrid oder New Norcia nahe Perth, Australien. Die Daten sämtlicher Instrumente werden zunächst zentral auf dem Hauptspeicher des Orbiters zwischengespeichert und später, wenn Verbindung zur Erde hergestellt werden kann, übermittelt. Das Übertragungsvolumen pro Tag variiert zwischen <1 und 6Gbit und kann durch die Einschaltung weiterer Empfangsstationen erhöht werden (Chicarro et al., 2004).

Das gesamte Mars Express Projekt wurde in einer Rekordzeit von 5 Jahren geplant und ein besonderes Augenmerk galt der Kosteneffizienz. Dieser Zeitrahmen konnte deshalb eingehalten werden, weil auf Grundlagen der gescheiterten Mars96 Mission zurückgegriffen werden konnte. Die Raumsonde wurde von der Firma Astrium in Toulouse gebaut, wo auch die Kalibrierung der HRSC-Kamera vorgenommen wurde (siehe Kapitel 2.3.1). Im Folgenden soll nun auf den Planeten Mars sowie die vorhandenen Bezugssysteme für geodätische Vermessungen eingegangen werden. Die Vorstellung der HRSC-Kamera und ihre innere und äußere Orientierung schließen dieses Kapitel ab.

2.1 Der Mars

Der Mars zählt in unserem Sonnensystem zu den terrestrischen Planeten, wie auch Merkur, Venus und die Erde. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sich vor etwa 4,6 Mrd. Jahren über dem Planetenkern und -mantel eine Kruste gebildet hat. Aus diesen Anfängen des Sonnensystems stammen auch die zahlreichen Einschlagkrater, die auf dem Mars aber auch auf dem Erdenmond gut sichtbar sind. Allerdings sind die Krater, aufgrund des Einflusses der Atmosphäre, auf dem Mars schon weiter verwittert.

Die Marsatmosphäre besteht zu 95 Prozent aus Kohlendioxid, einem Gas, welches in der Erdatmosphäre nur zu 0.03 Prozent vorkommt (Ohlhof, 1996). Zudem ist die Atmosphäre auf dem Mars extrem dünn. Dieser Sachverhalt darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch eine dünne Atmosphäre auf die Bildentstehung der hier verwendeten HRSC-Bilder einwirkt und die Grauwertentstehung ungünstig beeinflusst.

Wie schon erwähnt, dauert ein Marsjahr etwa doppelt so lange wie ein Erdenjahr. Außerdem ist die Rotation um die eigene Achse um 41.5 Minuten langsamer als die der Erde. Aufgrund der Neigung der Rotationsachse von 25.2° gegenüber der Ekliptik und einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne, ergeben sich ausgeprägte Jahreszeitenwechsel. An den Polen bilden sich deshalb Eiskappen aus gefrorenem Wasser und Kohlendioxid.

Aufgrund der starken Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht können sich regionale Windbewegungen zu Sandstürmen ausweiten, die den gesamten Planeten einhüllen.

Die folgende Tabelle stellt einige Fakten über den Mars zusammen:

Durchschnittliche Entfernung zur Sonne	227 940 000km	
Marsdurchmesser	6 794km	
Marsjahr	687 Erdentage	
Durchschnittstemperatur	-55°C	
Min. Temperatur	-133°C	(Polkappe, Winter)
Max. Temperatur	27°C	(Tagseite, Sommer)
Atmosphärendruck an der Oberfläche	6.35mbar	Nicht einmal ein Prozent des Drucks auf der Erde
Monde	Phobos Deimos	Durchmesser 22km Durchmesser 12km

Tabelle 2.3 Fakten zum Planeten Mars

2.2 Bezugssysteme auf dem Mars

Als globales Bezugssystem für den Mars wurde ein im Massenzentrum gelagertes Rotationsellipsoid festgelegt. Die Angaben im Referenzsystem werden durch planetographische Breiten und östlich positiv gezählte Längen festgelegt. Allerdings besteht auch eine ältere Konvention, welche westlich positiv gezählte Längen verwendet. Aus diesem Grunde muss die `POSITIV_LONGITUDE_DIRECTION` bei planetographischen Koordinaten immer mit angegeben werden. Der Nullmeridian wurde nach Definition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) durch den Airy-0-Krater festgelegt. Die Länge der großen Halbachse des Bezugsellipsoids beträgt 3396.19km, die Länge der kleinen Halbachse 3376.20km (Duxbury et al., 2002). Es ist ebenfalls möglich, Lagekoordinaten auf eine Kugel mit dem Radius von 3396.0km zu beziehen. Der Höhenbezugsrahmen wird durch eine Äquipotentialfläche, das Areoid, beschrieben (Albertz et al., 2004).

Es stehen somit drei Lagebezugssysteme zur Verfügung:

- Planetographische Koordinaten bezogen auf das Rotationsellipsoid mit westlich positiven Längen
- Planetographische Koordinaten bezogen auf das Rotationsellipsoid mit östlich positiven Längen
- Planetographische Koordinaten bezogen auf die Kugel mit östlich positiven Längen

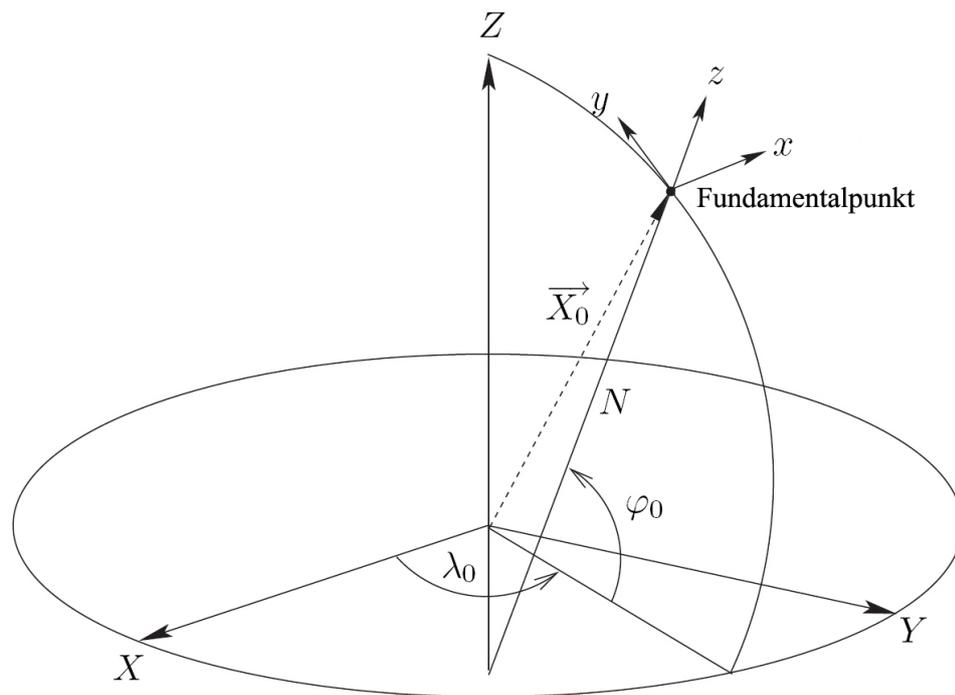


Abbildung 2.2 Der Fundamentalfunkt

Darüber hinaus besteht ein planetozentrisch-kartesisches Bezugssystem, das ebenfalls im Massezentrum gelagert ist. Zusätzlich bedingt die Arbeit in einem kleinen, regionalen Gebiet auf der Marsoberfläche ein lokales Bezugssystem. Hier wird ein lokales Tangentialsystem eingeführt, welches in einem Fundamentalfunkt mit den planetographischen Koordinaten φ_0, λ_0 , gelagert ist.

Die Abbildung 2.2 visualisiert den Zusammenhang zwischen den planetographischen Koordinaten φ_0, λ_0 des Fundamentalfunktes, dem Vektor \vec{X}_0 im globalen planetozentrisch-kartesischen Koordinatensystem sowie dem lokalen kartesischen Koordinatensystem (x, y, z) . Transformationen zwischen diesen Systemen werden in Kapitel 3.1 behandelt.

2.3 High Resolution Stereo Camera (HRSC)

Mars Express ist mit einem Kamerasystem ausgestattet, das eine Zeilenbildkamera und eine Flächensensorkamera vereint (siehe Abbildung 2.3). Die Zeilenbildkamera HRSC nimmt fortlaufend großflächig Gebiete der Marsoberfläche auf. Der Super Resolution Channel (SRC) kann Gebiete von besonderem Interesse zusätzlich hochauflösend abbilden.



Abbildung 2.3 Die High Resolution Stereo Camera

Das Kamerasystem wird eingesetzt (Neukum et al., 2004) zur

- Beschreibung von Oberflächenstrukturen und der Morphologie mit hoher Auflösung von $\geq 10\text{m/pix}$
- Beschreibung der Oberflächentopographie mit hoher Lage- und Höhengenaugigkeit
- Beschreibung von morphologischen Details durch SRC-Bilder
- Oberflächenklassifikation durch Farbbilder
- Verdichten des geodätischen Passpunktnetzes
- Beschreibung von atmosphärischen Besonderheiten
- Beschreibung von physikalischen Besonderheiten der Oberfläche durch Stereobilder
- Beobachtung der Marsmonde Phobos und Deimos

Somit tragen die erhobenen Daten dazu bei, die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Mars in folgenden Bereich zu erweitern:

- Geologische Evolution der Marsoberfläche
- Evolution des Vulkanismus und dessen Einfluss auf die Marsumgebung
- Vergangenheit des Marsklimas und seiner Veränderungen sowie die Rolle von Wasser in der Geschichte des Planeten
- Struktur der Marskruste
- Beziehungen zwischen Oberfläche und Atmosphäre (z.B. Frost)
- Atmosphärische Eigenschaften (Sandstürme, Wolken, Aerosolgehalt)
- Erkundung von Landflächen der Vergangenheit und Zukunft
- Unterstützung der Suche nach Leben.

In dieser Arbeit werden ausschließlich Bilddaten der HRSC-Kamera verwendet, da sie für die Mult-Image Shape-from-Shading-Methode prädestiniert sind. Auf den Flächensensor SRC wird also nicht weiter eingegangen.

Die High Resolution Stereo Camera wurde ursprünglich für die fehlgeschlagene russische Mars96-Mission entwickelt (Albertz et al., 1993). Somit konnte auf umfangreiche Testergebnisse zurückgegriffen werden, die aus Messkampagnen auf der Erde mit zwei HRSC-Modellen gewonnen wurden und die Funktionsfähigkeit nachweisen (Scholten et al., 1999; Rosenberg, 2001). Es mussten für den Einsatz auf Mars Express nur geringfügige Änderungen vorgenommen werden.

Die HRSC ist eine Zeilenbildkamera mit neun Sensorzeilen. Diese setzen sich aus fünf panchromatischen Stereokanälen und vier Spektralkanälen (nahes Infrarot, Rot, Grün, Blau) zusammen. Die Sensorzeilen sind quer zur Flugrichtung angeordnet. Ein Sensor blickt senkrecht nach unten und bildet den Nadirkanal. Alle weiteren sind als vor- oder rückblickende Kanäle in Winkeln von $+18,9^\circ$, $+12,8^\circ$, $-12,8^\circ$, $-18,9^\circ$ gegenüber diesem Nadirkanal geneigt (siehe Abbildung 2.4). Diese Sensoranordnung begünstigt die photogrammetrische Stereoauswertung, da aufgrund der hohen Flug- und Aufnahmegeschwindigkeit ein Punkt auf der Marsoberfläche nahezu simultan durch vor- und rückblickende Sensoren erfasst wird. Deshalb haben Änderungen in der Atmosphäre und bei den Lichtverhältnissen kaum einen Einfluss auf die Bildqualität der einzelnen Kanäle untereinander.

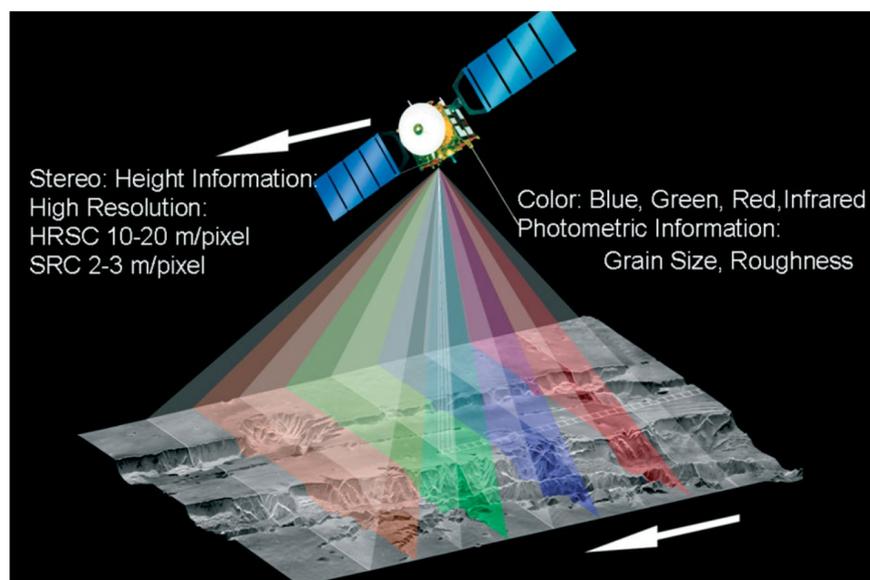


Abbildung 2.4 Aufnahmeprinzip der HRSC

Durch den stark elliptischen Orbit und die dadurch variierende Flughöhe der Sonde über der Marsoberfläche, ändert sich der Bildmaßstab ständig. Für den Nadirkanal mit einer Kamerakonstante von 0.175m und bei geringster Flughöhe von 259km kann ein Bildmaßstab von

$$m_b = \frac{h[m]}{c[m]} = \frac{259000}{0.175} \approx \underline{1,5 \text{ Millionen}}$$

erreicht werden. Bei der Pixelgröße von $7\mu\text{m}$ ergibt sich eine Objektpunktgenauigkeit in der Lage von:

$$s_{XY} = 1500000 * 7\mu\text{m} \approx \underline{10\text{m}}$$

Um Speicherplatz zu sparen und das Übertragungsvolumen vom Orbiter zur Erde gering zu halten, werden sämtliche vor- und rückblickenden Kanäle in einem Makropixelmodus betrieben. Das heißt, dass entweder 2x2, 4x4 oder 8x8 Pixel zusammengefasst werden. Nur der Nadirkanal wird mit voller Auflösung übertragen. Die Bildinformationen werden zusätzlich mit einem JPEG-Algorithmus und einem Kompressionsfaktor zwischen sechs und zehn komprimiert.

Nachdem die HRSC-Bilddaten auf der Erde empfangen wurden, werden sie zunächst zum Europäischen Raumflugkontrollzentrum (ESOC) nach Darmstadt geleitet, dort aufbereitet und anschließend zum DLR-Institut für Planetenforschung nach Berlin übertragen. Die Verarbeitung der Daten ist in höchstem Maße automatisiert, so dass der Hauptteil der Prozessierung innerhalb weniger Stunden nach Empfang erfolgt.

Die Prozessierung ist in Level unterteilt. Die Bilddaten werden in

- Level 1 aus dem Telemetrieformat entpackt und dekomprimiert.
- Level 2 radiometrisch kalibriert.
- Level 3 auf der Grundlage eines MOLA-DGMs entzerrt.
- Level 4 zur Generierung eines DGMs mit 200m Auflösung herangezogen

In Level 3 wird ein DGM aus MOLA-Daten der „Mars Global Surveyor“ Mission (MGS) verwendet. Dieses DGM ist global für den gesamten Mars mit einer Auflösung von ca. 450m verfügbar (Heipke et al., 2005) und bietet sich deshalb als Grundlage an. Aufgrund der Flugbahn der MGS-Sonde weist das aus Laserpunkten interpolierte DGM teilweise erhebliche Lücken zwischen den Flugstreifen auf. Diese Abstände zwischen den Flugstreifen betragen im Mittel 1km und sind in Äquaturnähe am größten (Ebner et al., 2004).

Die gesamte Prozessierungskette der HRSC-Bilder ist in der folgenden Abbildung 2.5 ersichtlich. Die Eingabedaten sind gelb markiert, Ausgabedaten sind in rot dargestellt. Zunächst werden durch Bündelblockausgleichung die Orientierungsdaten verbessert (siehe Kapitel 2.3.2). Im weiteren Verlauf werden Digitale Oberflächenmodelle (DOM), Orthophotos und Orthophotomosaik

erzeugt. Die vorliegende Arbeit ist im Bereich „Shape-from-Shading“ angesiedelt und trägt zur Verbesserung der Digitalen Oberflächenmodelle bei.

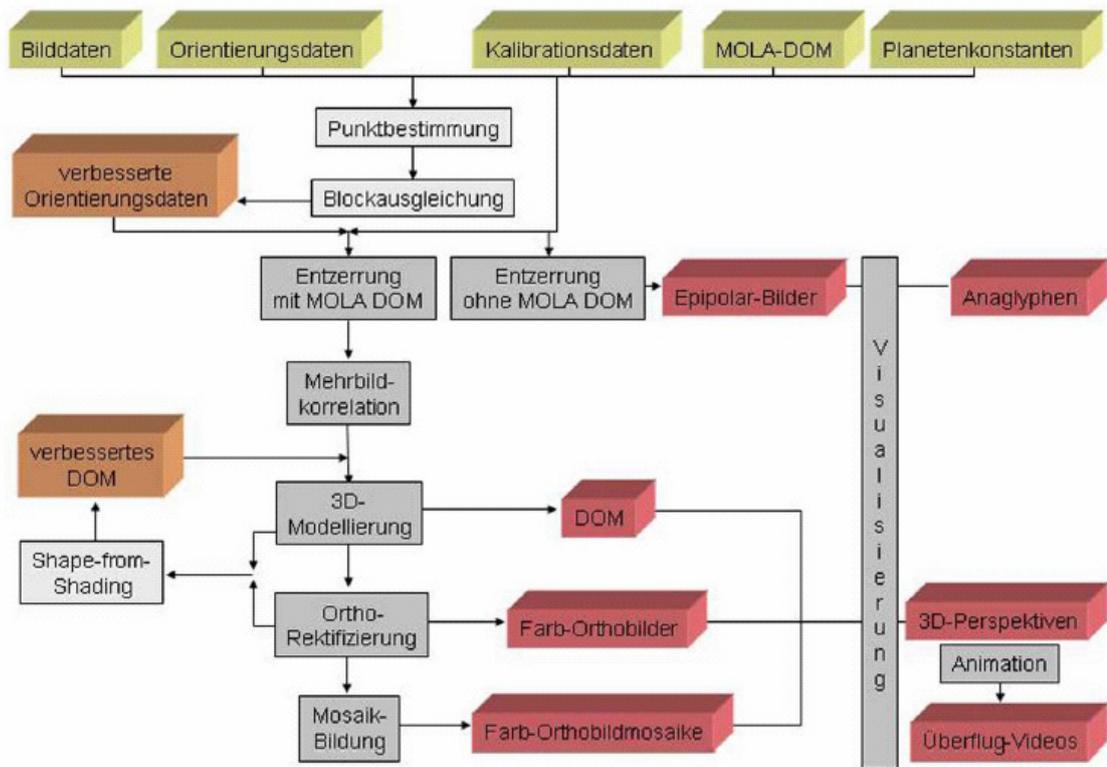


Abbildung 2.5 Prozessierungskette für HRSC-Daten

2.3.1 Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung beschreiben die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Koordinatensystem, bezogen auf die Bildebene sowie die Abweichungen des mathematischen Modells von der Zentralperspektive.

Für ein Zeilenbild gilt die Zentralperspektive nur in Zeilenrichtung, in Flugrichtung aber Parallelprojektion. Die unabhängigen Zeilenbilder werden zu einem Bildstreifen zusammengefügt. Für ein einzelnes Zeilenbild in einem Bildstreifen kann näherungsweise Zentralprojektion angenommen werden. Somit kann die Definition der inneren Orientierung einer Flächenbildkamera auch für die Zeilenbildkamera HRSC angewandt werden.

In der folgenden Abbildung 2.6 sind die Parameter der inneren Orientierung

- das Projektionszentrum PZ , Mittelpunkt des Objektivs,
- der Bildhauptpunkt H , lotrechte Projektion des PZ in die Bildebene,
- die Kamerakonstante c , der Abstand zwischen PZ und H

im Referenzsystem, dem Kamerakoordinatensystem (x', y', z') dargestellt.

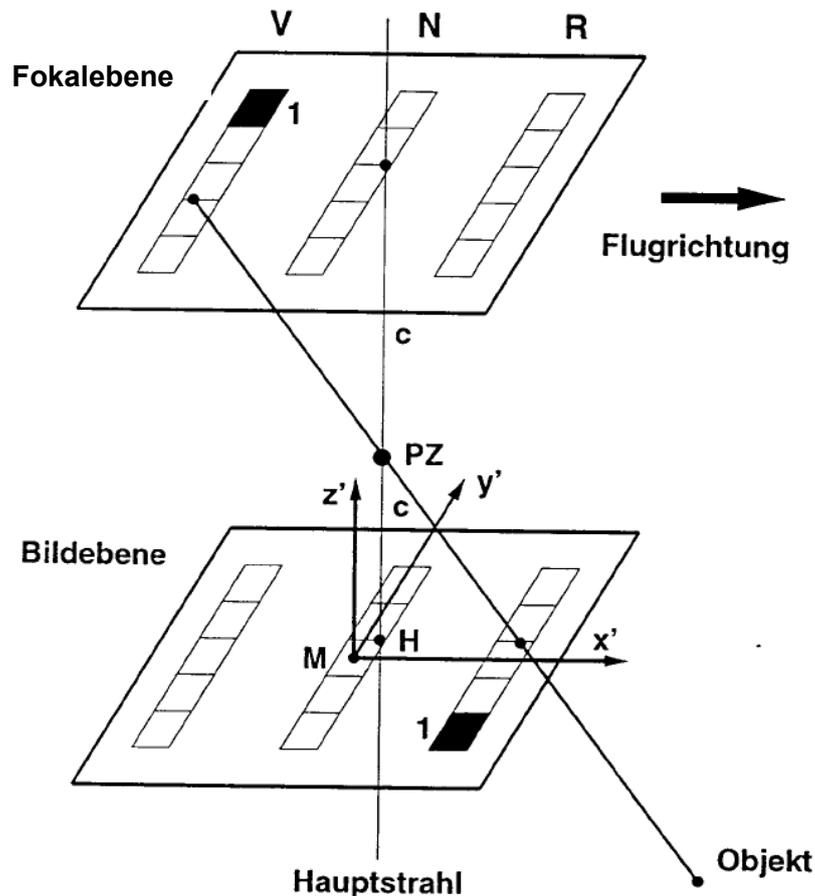


Abbildung 2.6 Das Kamerakoordinatensystem

Die x' -Achse des Bildkoordinatensystems zeigt in Flugrichtung, die z' -Achse parallel zum Hauptstrahl, der Bildseite zugewandt und die y' -Achse vervollständigt ein rechtshändiges Koordinatensystem. Die Abbildung zeigt hier exemplarisch die Geometrie eines Drei-Zeilen-Scanners. Es befinden sich jedoch bei HRSC alle neun Sensorzeilen hinter einem Projektionszentrum.

Die einzelnen Sensorzeilen besitzen bei dem in dieser Arbeit verwendeten Kameramodell jeweils ein eigenes Bildkoordinatensystem (Ohlhof, Kornus, 1994). Sie sind gegenüber dem Referenzsystem der Kamera nicht nur für den Vor- und Rückblick geneigt, sondern auch in der Fokalebene versetzt. Somit hat

jede Sensorzeile eine eigene Kamerakonstante c . Zusätzlich müssen sechs Parameter eingeführt werden, um die Position einer Zeile gegenüber dem Referenzsystem beschreiben zu können. Die Parameter setzen sich aus drei Translationen $\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$ sowie drei Rotationen $\Delta \varphi$, $\Delta \omega$, $\Delta \kappa$ zusammen. Sie fließen in die erweiterte Kollinearitätsgleichung (siehe Kapitel 3.1.1.1) ein.

Die physikalische Sensorbreite einer Zeile beträgt 5336 Pixel. Allerdings werden nur 5176 Pixel aktiv zur Bilderzeugung benutzt. Die volle Auflösung kommt beim Nadirkanal zum Tragen. Alle Stereokanäle werden, wie schon zu Beginn des Kapitels 2.3 beschrieben, im Makropixelmodus mit verschiedenen Kompressionsstufen betrieben. Die Zusammenfassung der Pixel findet in der Kameraelektronik statt. Für einen Makromodus von beispielsweise 2x2, beträgt die Pixelgröße $14\mu\text{m}$ statt $7\mu\text{m}$ und die Bildzeile ist nur halb so groß wie bei voller Auflösung.

Alle Parameter der inneren Orientierung werden in einer geometrischen Kalibrierung des Sensors ermittelt (Ohlhof, Kornus, 1994). Darüber hinaus werden Ablagewerte jedes Pixels von der Solllage in Zeilen- und Spaltenrichtung berechnet. Diese Ablagewerte werden später bei den Transformationen zwischen Bild- und Pixelkoordinatensystem mit berücksichtigt. Die Kalibrierung erfolgt mittels eines Kollimators, welcher den Winkel α in Zeilenrichtung sowie den Winkel β senkrecht zur Sensorzeile ermittelt. Da von außen durch die Optik hindurch gemessen wird, sind sämtliche Einflüsse, die im Strahlengang des Sensors auftreten, enthalten.

Abbildung 2.7 zeigt den Kalibrierungsaufbau, mit einem Kollimator und der HRSC auf einem Kippdrehtisch (Kornus, 1996). Der Kippdrehtisch kann sehr präzise in beide Winkelrichtungen bewegt werden.

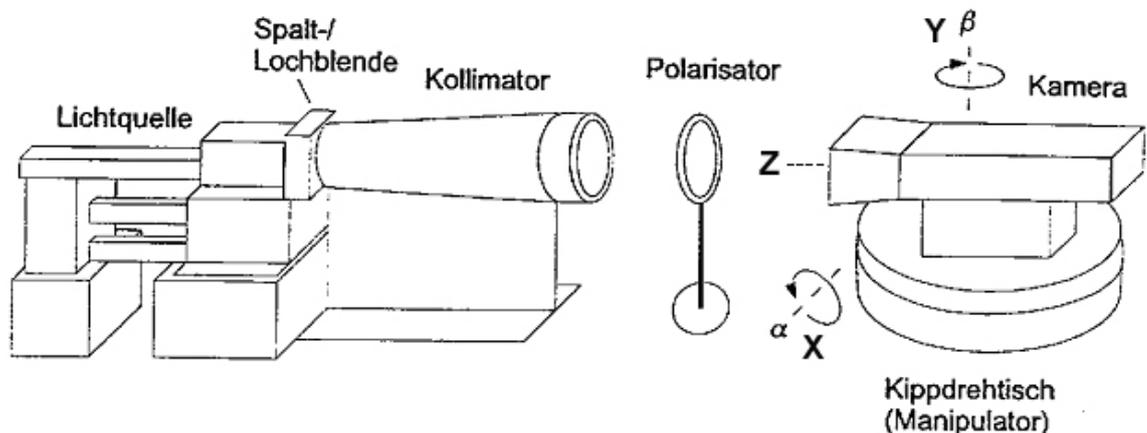


Abbildung 2.7 Kallibrierung der HRSC

Der Ursprung des Tischkoordinatensystems X, Y, Z des Kippdrehtisches fällt mit dem Projektionszentrum der Kamera zusammen und die Z -Achse verläuft parallel zum Kollimationsstrahl in Nullstellung ($\alpha = \beta = 0$).

Durch diese Verknüpfung ist es möglich, aus den gemessenen Winkeln α und β die Bildkoordinaten zu berechnen (Ohlhof, Kornus, 1994):

$$\begin{pmatrix} x' - x'_0 \\ y' - y'_0 \\ c \end{pmatrix} = R_x(\alpha)R_y(\beta) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{pmatrix} \quad 2.1$$

x', y'	Bildkoordinaten
x'_0, y'_0	Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes
$R_x(\alpha)$	Rotationsmatrix um X-Achse
$R_y(\beta)$	Rotationsmatrix um Y-Achse
d	Abstand zwischen PZ und angemessenem Pixel

Umstellen der Gleichung 2.1 ergibt nach Elimination des Parameters d :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} \tan \beta / \cos \alpha \\ -\tan \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad 2.2$$

Die Bildkoordinaten aus Gleichung 2.2 beziehen sich auf das Referenzsystem der Kamera. Um die Koordinaten auf das zugehörige Zeilenbildkoordinatensystem zu beziehen, muss die Gleichung 2.2 durch die Parameter $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, \bar{c} ausgedrückt werden (Gleichung 2.3). Die innere Orientierung einer Sensorzeile wird durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate gefunden. Die Verbesserungsgleichung lautet:

$$\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{\bar{\alpha} + (n - M)\text{pix}}{\bar{c}}\right) \\ \bar{\beta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad 2.3$$

$\bar{\alpha}$	Verschiebung der Kollimationsstrahles vom Zentrum der Sensorzeile in Zeilenrichtung
$\bar{\beta}$	Konvergenzwinkel

\bar{c}	Abstand zwischen PZ und Sensorzeile
M	Zentrum der Sensorzeile
n	Pixelnummer
pix	Pixelgröße

Die Ablagewerte eines Pixels können nun mit Hilfe der partiellen Ableitungen von Gleichung 2.2 nach α und β berechnet werden:

$$\begin{pmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{pmatrix} = \bar{c} \begin{pmatrix} \frac{1}{\cos(\alpha) \cdot \cos^2(\beta)} v_\beta \\ -\frac{1}{\cos^2(\alpha)} v_\alpha \end{pmatrix} \quad 2.4$$

Die Messung wird nur für einige Pixel auf einer Sensorzeile vorgenommen. Alle weiteren Werte werden aus der Interpolation zwischen den Messwerten bezogen.

Die folgenden zwei Abbildungen 2.8 und 2.9 verdeutlichen den Zusammenhang noch einmal.

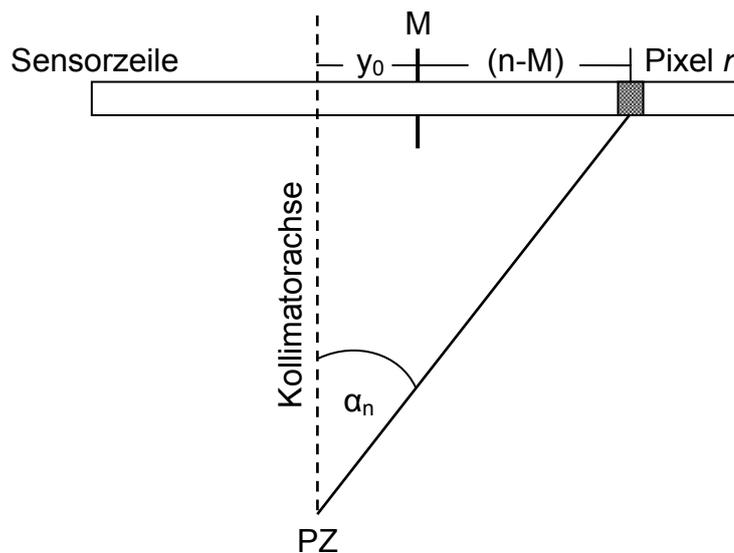


Abbildung 2.8 Schematische Darstellung der Y-Z-Ebene

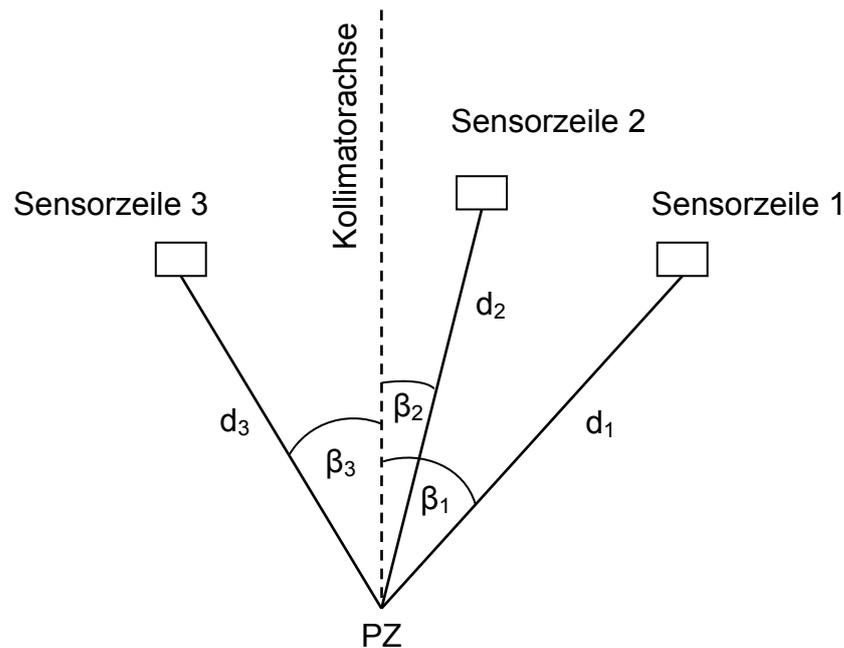


Abbildung 2.9 Schematische Darstellung der X-Z Ebene

2.3.2 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Lage des Projektionszentrums der Kamera im übergeordneten Objektkoordinatensystem. Ihre Parameter sind die Position des Projektionszentrums mit den Objektkoordinaten X_0 , Y_0 , Z_0 sowie die drei Drehwinkel φ , ω , κ . Bei der HRSC bezieht sich die äußere Orientierung auf das Kamerakoordinatensystem, welches die Referenz der neun Bildkoordinatensysteme darstellt.

Für einen Aufnahmezeitpunkt eines Zeilenbildes wird die äußere Orientierung aus einer Kombination von Positionsmessungen der Mars Express Sonde berechnet. Hierzu tragen Dopplermessungen, Triangulationen und die Positionierung eines Sternensensors bei. Darüber hinaus richten Kreiselssysteme die Sonde mit Hilfe des Sternensensors nach Vorgabe der Aufnahmeplanung aus.

Zusammengenommen kann die dreidimensionale Positionsbestimmung des Orbiters für einen Aufnahmezeitpunkt als genäherte äußere Orientierung der klassischen Photogrammetrie angesehen werden (Heipke et al., 2004). Allerdings reicht die Genauigkeit der Positionsbestimmung für eine präzise photogrammetrische Auswertung nicht aus. In einer Bündelblockausgleichung werden neben diesen Näherungswerten auch Verknüpfungspunkte aus der digitalen Bildzuordnung (Matching) eingeführt (Heipke et al., 2004; Oberst et al., 2004).

Das Ziel ist es, die Zeilenbilder in einem marsfesten Koordinatensystem zu orientieren. Da aber kaum Passpunkte auf der Marsoberfläche für die Orientierung zur Verfügung stehen, wird ein vorhandenes digitales Geländemodell als Passinformation herangezogen. Dieses MOLA-DGM ist das gleiche, das auch in Level 3 der HRSC-Bildprozessierung zur Entzerrung verwendet wird.

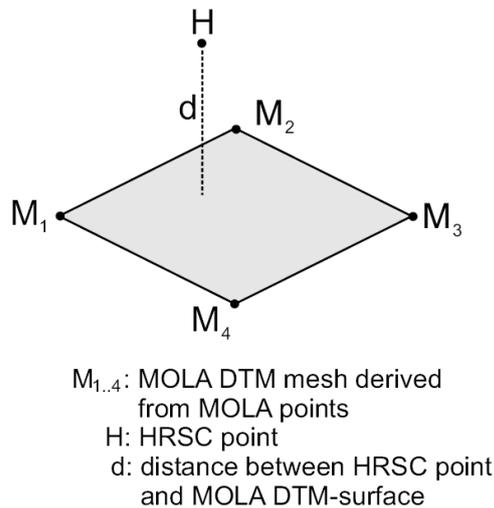


Abbildung 2.10 MOLA-DGM und HRSC-Punkt H

Wie in Abbildung 2.10 ersichtlich, besteht das DGM aus einem gleichmäßigen Raster, das aus Laserpunkten interpoliert wurde. Es kommt ein Ausgleichungsansatz zum Einsatz, den Spiegel et al. (2003) vorgestellt haben. Es handelt sich um eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit zusätzlichen Bedingungen, womit ein Zusammenhang zwischen DGM und Bündelblockausgleichung ohne Passpunkte hergestellt werden kann. Ein HRSC-Punkt *H* wird bestmöglich in die von MOLA-Punkten *M_x* aufgespannte Oberfläche eingepasst.

Für jede Bildzeile in einem HRSC-Bildstreifen muss eine äußere Orientierung bereitgestellt werden. Um den Aufwand zu reduzieren, wird die äußere Orientierung nur für einige sogenannte Orientierungsbilder vorgenommen (siehe Abbildung 2.11). Für alle weiteren Bildzeilen wird die Orientierung mit einem Polynom dritten Grades interpoliert.

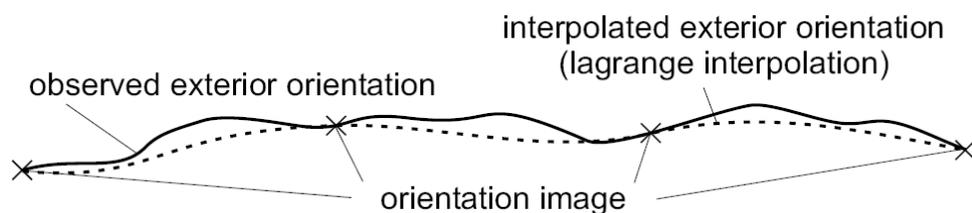


Abbildung 2.11 Orientierungsbilder

3 Grundlagen

3.1 Transformationen

3.1.1 Transformation von Objektkoordinaten in Pixelkoordinaten

In diesem Abschnitt wird die erweiterte Kollinearitätsgleichung als Grundlage des mathematischen Kameramodells für Zeilenbildkameras vorgestellt. Anschließend wird die Methode für eine Transformation von Objektkoordinaten in das Pixelkoordinatensystem einer Bildzeile erläutert und die dafür benötigten Gleichungen vorgestellt.

3.1.1.1 Erweiterte Kollinearitätsgleichung und Ableitung nach den Höhen

Die HRSC ist eine Zeilenbildkamera mit neun Sensorzeilen. Im Gegensatz zur Flächenbildkamera, bei der eine Bildebene mit einem Pixelarray belegt ist, sind bei der Zeilenbildkamera hinter dem Projektionszentrum mehrere Sensorzeilen in unterschiedlicher Ausrichtung für vor-, nadir- und rückblickende Richtungen angeordnet. Somit reicht die ursprüngliche Kollinearitätsgleichung zur Transformation von Objektkoordinaten in das Bildkoordinatensystem nicht mehr aus. Die Kollinearitätsgleichung muss um eine zusätzliche Transformation erweitert werden. Diese Erweiterung beinhaltet für jede Sensorzeile Translationen und Rotationen gegenüber der Referenz, dem Kamerakoordinatensystem (Heipke et al., 2004). Diese zusätzlichen sechs Parameter pro Sensorzeile setzen sich aus den Verschiebungen Δx , Δy , Δz und den Drehungen $\Delta \varphi$, $\Delta \omega$, $\Delta \kappa$ zusammen und gehören zu den Parametern der inneren Orientierung. Die Gleichung 3.1 zeigt die um die Matrix M erweiterte Kollinearitätsgleichung.

$$\begin{pmatrix} x' - x'_0 \\ y' - y'_0 \\ -c \end{pmatrix} = M^T(\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa) D^T(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0) \begin{pmatrix} X - (X_0 + \Delta X_0) \\ Y - (Y_0 + \Delta Y_0) \\ Z - (Z_0 + \Delta Z_0) \end{pmatrix} \quad 3.1$$

x', y'	Bildkoordinaten
x'_0, y'_0	Bildhauptpunkt
c	Kamerakonstante
M	Innere Drehmatrix
D	Äußere Drehmatrix
X, Y, Z	Objektpunktkoordinaten
X_0, Y_0, Z_0	Projektionszentrum im Objektkoordinatensystem
$\varphi_0, \omega_0, \kappa_0$	Drehwinkel der äußeren Orientierung
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Innere Orientierung einer Sensorzeile
$\Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa$	

Die äußere Drehmatrix D und die innere Drehmatrix M werden zur Matrix R zusammengefasst:

$$M^T D^T = R^T$$

3.2

Die Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die Koordinatensysteme und die Transformationsmatrizen.

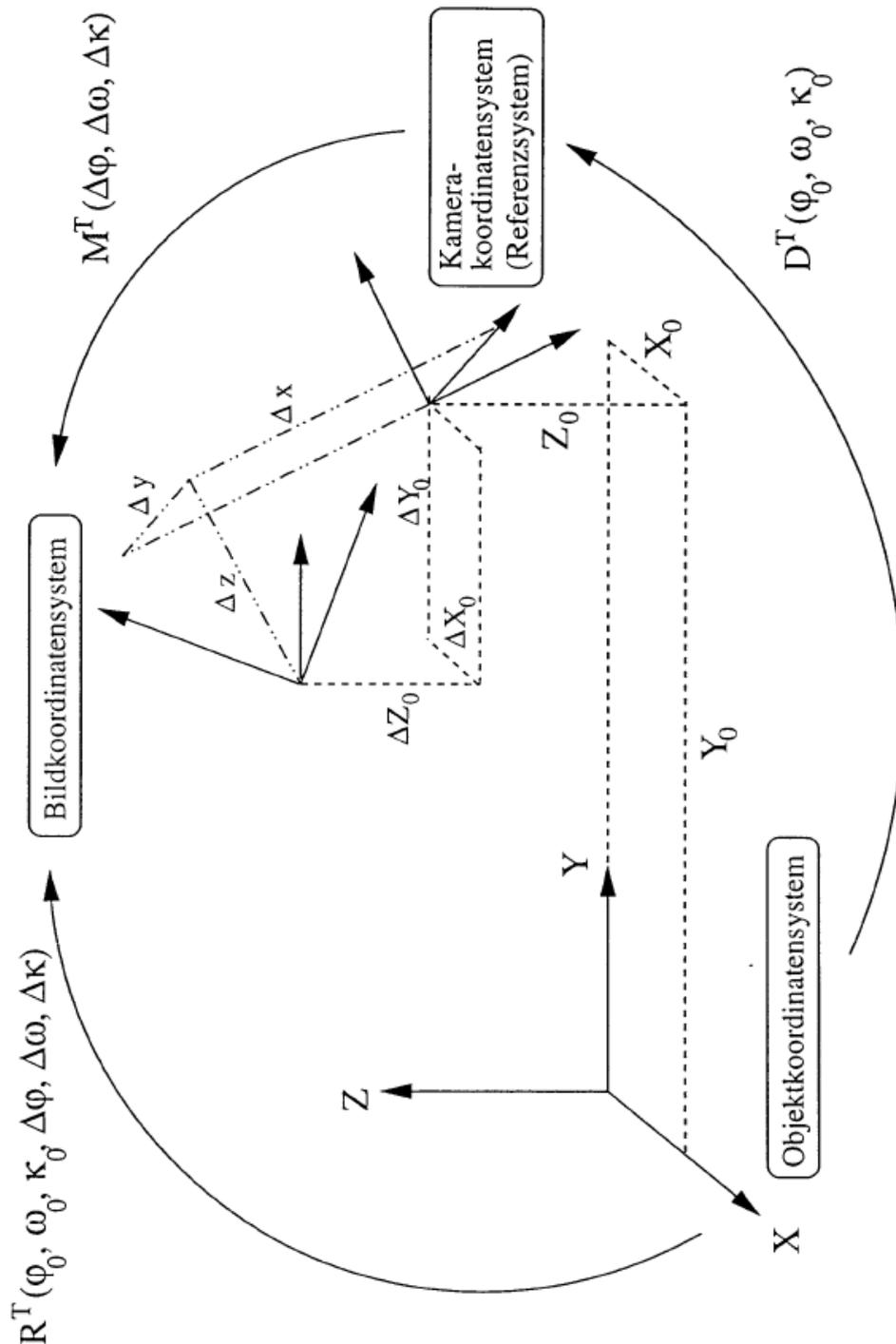


Abbildung 3.1 Orientierung der Koordinatensysteme

Die Umstellung nach den Bildkoordinaten x' und y' ergibt für die erweiterte Kollinearitätsgleichung:

$$x' = x'_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) - (m_{11}\Delta x + m_{21}\Delta y + m_{31}\Delta z)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) - (m_{13}\Delta x + m_{23}\Delta y + m_{33}\Delta z)} \quad 3.3$$

$$y' = y'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) - (m_{12}\Delta x + m_{22}\Delta y + m_{32}\Delta z)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) - (m_{13}\Delta x + m_{23}\Delta y + m_{33}\Delta z)} \quad 3.4$$

Im Kapitel 3.3.7 wird für den Ausgleichungsansatz der MI-SFS Methode die partielle Ableitung der erweiterten Kollinearitätsgleichung nach den Höhen benötigt. Deshalb werden an dieser Stelle die Ableitungen vorgestellt. Der Übersicht halber werden die Zähler für die x - und y -Bildkoordinate sowie der Nenner der Kollinearitätsgleichung wie folgt zusammengefasst:

$$ZX = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) - [m_{11}\Delta x + m_{21}\Delta y + m_{31}\Delta z] \quad 3.5$$

$$ZY = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) - [m_{12}\Delta x + m_{22}\Delta y + m_{32}\Delta z] \quad 3.6$$

$$NEN = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) - [m_{13}\Delta x + m_{23}\Delta y + m_{33}\Delta z] \quad 3.7$$

Partielle Ableitung nach den Höhen für die x' -Bildkoordinate:

$$\frac{\partial}{\partial Z} = x'_0 - c \frac{ZX}{NEN}$$

$$\Rightarrow -\frac{c r_{31}}{NEN} + \frac{c ZX r_{33}}{NEN^2} \quad 3.8$$

Zusammenfassen:

$$\Rightarrow -\frac{c NEN r_{31}}{NEN^2} + \frac{c ZX r_{33}}{NEN^2}$$

$$\Rightarrow -\frac{c}{NEN^2} (NEN r_{31} - ZX r_{33}) \quad 3.9$$

Partielle Ableitung nach den Höhen für die y' -Bildkoordinate:

$$\frac{\partial}{\partial Z} = y'_0 - c \frac{ZY}{NEN}$$

$$\Rightarrow -\frac{c r_{32}}{NEN} + \frac{c ZY r_{33}}{NEN^2} \tag{3.10}$$

Zusammenfassen entsprechend:

$$\Rightarrow -\frac{c}{NEN^2} (NEN r_{32} - ZY r_{33}) \tag{3.11}$$

3.1.1.2 Vorstellung der Transformationsmethode

Bei der Transformation einer Objektkoordinate ins Bild werden die entsprechenden Bildkoordinaten in x' und y' ermittelt (vgl. Kapitel 3.1.1.1, Gleichung 3.3 und 3.4). Dafür ist es nötig, die äußere Orientierung der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt zu kennen. Allerdings ist der Aufnahmezeitpunkt eines Objektpunktes und somit die Bildzeile, welche die Verknüpfung zur äußeren Orientierung darstellt, nicht bekannt. Die benötigte äußere Orientierung muss für die Transformation erst ermittelt werden, wobei eine Lösung iterativ gefunden wird (Brand et al., 1997).

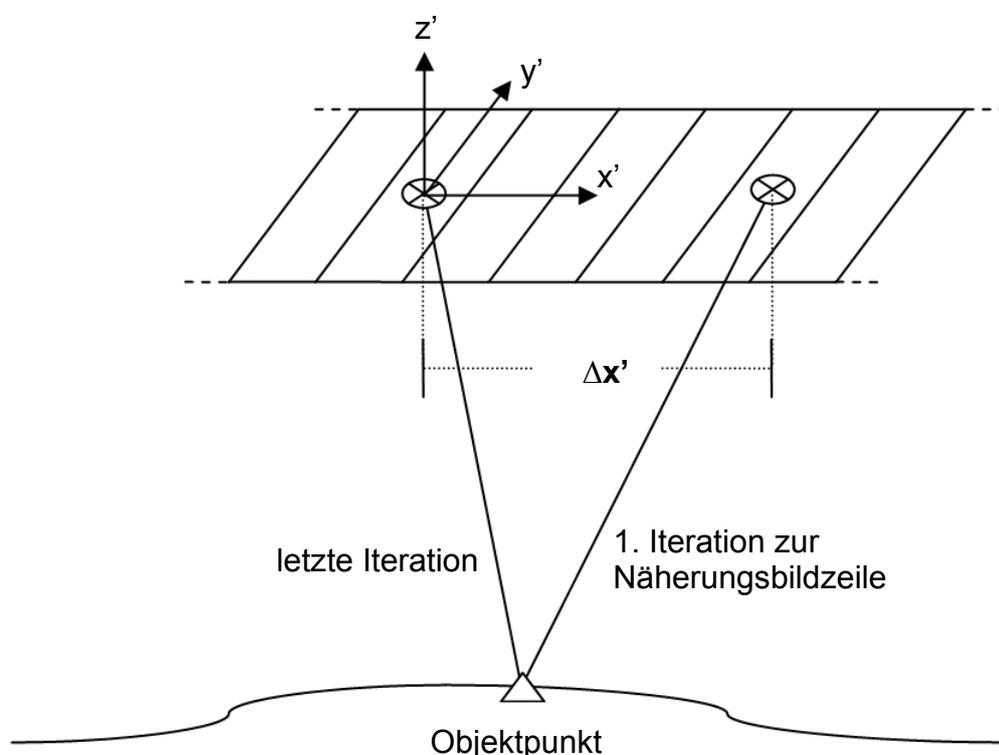


Abbildung 3.2 Schematische Darstellung zur Transformation vom Objekt ins Bild

Man bedient sich der Bedingung, dass die x' -Bildkoordinate eines Zeilenbildes null sein muss (siehe Kapitel 3.1.1.4). Für die erste Iteration kann jede beliebige Zeile, als grober Näherungswert der gesuchten Bildzeile, im Bildstreifen dienen. Mit dieser äußeren Orientierung der Näherungszeile wird die Objektpunktcoordinate ins Bild transformiert. Wenn die ermittelte x' -Bildkoordinate einen Wert ungleich null annimmt, wird diese Verbesserung $\Delta x'$ auf die x' -Koordinate der Näherungszeile addiert und mit der verbesserten Bildzeile erneut transformiert. Die korrekte Bildzeile ist gefunden, wenn die Verbesserung der x' -Bildkoordinate kleiner als ein Schwellenwert ist und die Bedingung $x' \approx 0$ erfüllt ist. Abbildung 3.2 verdeutlicht dieses Vorgehen.

Für die vorgestellte Transformationsmethode müssen, neben der Transformation der Objektkoordinaten ins Bildkoordinatensystem mittels der erweiterten Kollinearitätsgleichung, Transformationen zwischen Bild- und Pixelkoordinatensystem durchgeführt werden, die im Folgenden behandelt werden. Die Umsetzung der Transformationsmethode im Programm MI-SFS wird in Kapitel 4.5.5 vorgestellt.

3.1.1.3 Pixelkoordinaten in Bildkoordinaten

Auf die Eigenschaften sowie den Aufbau einer Sensorzeile der HRSC-Kamera wurde bereits in Kapitel 2.3 eingegangen. Bilddaten werden nur mit den Pixeln erzeugt, die im aktiven Fensterbereich n_{Window} der Sensorzeile liegen. Bei der Transformation von Pixelkoordinaten in Zeilenbildkoordinaten muss zunächst die Spaltenposition des Pixels im Bild y_{pi} auf die physikalische Gesamtgröße n der Sensorzeile bezogen werden (Neukum, 1997).

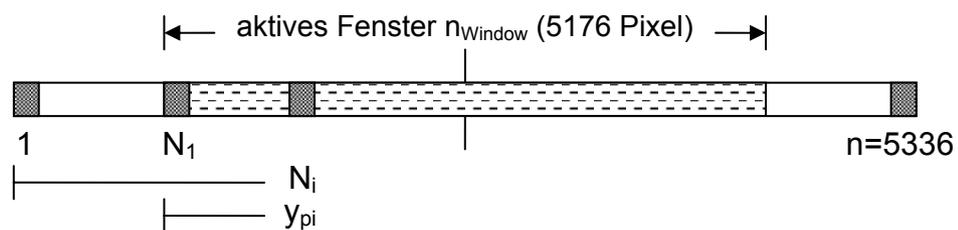


Abbildung 3.3 Eine Sensorzeile mit aktivem Fenster n_{Window}

Die Formel 3.12 zeigt die Berechnung der absoluten Position eines Pixels auf der Sensorzeile.

$$N_i = N_1 + y_{pi} * macropix + 1 \quad 3.12$$

N_i	Physikalische Pixelnummer
N_1	Physikalische Pixelnummer des 1. aktiven Pixels
y_{pi}	Spaltenposition im aktiven Sensorbereich
$macropix$	Pixelzusammenfassung (2, 4, 8)

Für jedes Pixel N_i liegen aus der Laborkalibrierung Ablagewerte von der Solllage vor (vgl. Kapitel 2.3.1). Diese können der absoluten Position auf der Sensorzeile zugeordnet werden und sind im Folgenden anzubringen. Mit den Formeln 3.13 und 3.14 wird aus dem Pixelkoordinatensystem ins Zeilenbildkoordinatensystem transformiert.

$$x' = -xkalib(N_i) * pix * flightdir \quad 3.13$$

$$y' = \left(\left(\frac{n}{2} + 0.5 \right) - N_i - ykalib(N_i) \right) * pix * flightdir \quad 3.14$$

x', y'	Zeilenbildkoordinaten [mm]
$xkalib, ykalib$	Kalibrierungswerte in x und y [Pixel]
n	Gesamtzahl physikalischer Pixel einer Sensorzeile [Pixel]
pix	Pixelgröße [Pixel]
$flightdir$	Ausrichtung des Orbiters zur Zeit der Aufnahme

Der Faktor „*flightdir*“ gibt an, ob der Orbiter zur Zeit der Aufnahme um 180° um die Vertikalachse gedreht war. Bei normalem Flug ist der Wert von *flightdir* = 1 bei Drehung um 180° ist *flightdir* = -1. Diese Spiegelung bei der Bildaufzeichnung wird somit durch die Drehung des Koordinatensystems berücksichtigt.

3.1.1.4 Bildkoordinaten in Pixelkoordinaten und Ableitung nach x' und y'

Bei der Transformation der Bildkoordinaten x' und y' in Pixelkoordinaten, muss berücksichtigt werden, dass bei einem Zeilenbild die x' -Koordinate annähernd Null ist (siehe Abbildung 3.4). Aufgrund dessen kann ausschließlich die Spaltenposition y_{pi} berechnet werden. Die Transformation ist also unabhängig von x' ; die Zeilennummer x_{pi} im Bildstreifen stellt nur den Bezug zur äußeren Orientierung dar.

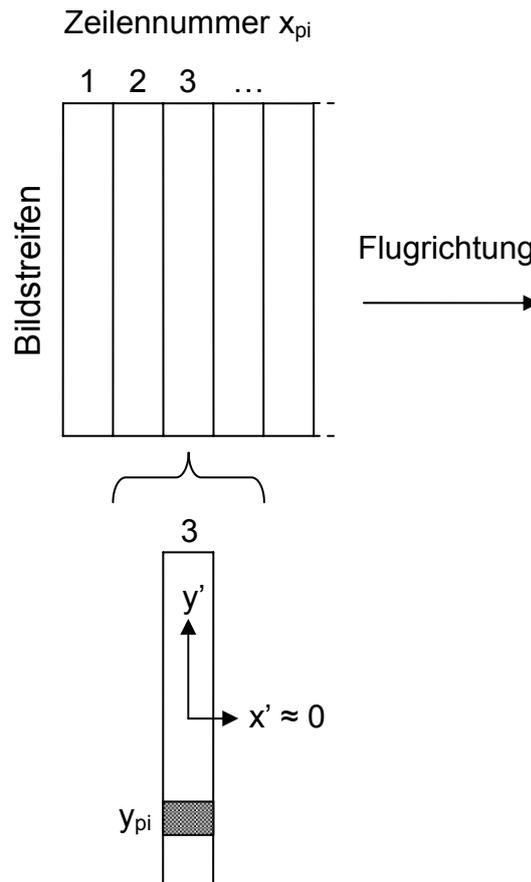


Abbildung 3.4 Bildstreifen und Zeilenbildkoordinatensystem einer Sensorzeile

Zunächst muss die physikalische Pixelposition N_i der Zeilenbildkoordinate y' ermittelt werden. Dies geschieht durch Umstellen der Gleichung 3.14 nach N_i .

$$N_i - y_{kalib}(N_i) = \left(\frac{n}{2} + 0.5 \right) - \frac{y'}{pix * flightdir} \quad 3.15$$

Bleibt der Kalibrierungswert zunächst unberücksichtigt ergibt sich:

$$N_i = \left(\frac{n}{2} + 0.5 \right) - \frac{y'}{pix * flightdir} \quad 3.16$$

Bei Berücksichtigung des Kalibrierungswertes (vgl. Kapitel 2.3.1) kann die implizite Gleichung 3.15 nicht gelöst werden. Hier muss die Lösung iterativ gefunden werden (Hickl, 1999):

- N_i ohne die Kalibrierung als Näherungswert bestimmen
- Der entsprechende Kalibrierungswert $x_{kalib}(N_i)$ wird angebracht
- Der erhaltene Wert wird mit dem Sollwert $[N_i - kalib(N_i)]$ aus Gleichung 3.15 verglichen.
- Differenz (Soll-Ist) > Schwellenwert: Die Differenz wird zum Näherungswert addiert und die Iteration mit diesem neuen Näherungswert fortgesetzt, bis der Schwellenwert unterschritten ist.

Mit Hilfe von Gleichung 3.17 kann anschließend, mit der nun bekannten physikalischen Pixelnummer N_i sowie den zugehörigen Kalibrierungswerten, die Bildspalte ermittelt werden.

$$Spalte = n_{Window} - \frac{(N_i - N_1)}{macropix} \quad 3.17$$

Spalte Spaltenposition im Bild [Pixel]
n_{Window} Gesamtzahl Pixelspalten im aktiven Sensorbereich [Pixel]

Ableitung

Für die Formel zur Berechnung der Pixelspalte aus dem Bildkoordinatensystem wird in Kapitel 3.3.7 die Ableitung nach den Bildkoordinaten benötigt. Die Gleichung 3.17 mit aufgelöstem N_i und ohne Berücksichtigung der Kalibrierungswerte lautet:

$$Spalte = n_{Window} - \frac{\left(\left(\frac{n}{2} + 0.5 \right) - \frac{y'}{pix * flightdir} \right) - N_1}{macropix} \quad 3.18$$

Alle Werte sind konstant bis auf y' . Somit ergibt sich die Ableitung:

$$\frac{\partial}{\partial y'} = \frac{1}{pix * flightdir * macropix} \quad 3.19$$

Die Ableitung für die Bildzeile lautet:

$$\frac{\partial}{\partial x'} = \frac{1}{pix} \quad 3.20$$

3.1.2 Planetographische Koordinaten in planeozentrisch-kartesische Koordinaten

Die planetographischen Koordinaten mit der Breite φ und der Länge λ beziehen sich auf ein Marsellipsoid oder eine Marskugel (vgl. Kapitel 2.2). In beiden Fällen können die Koordinaten mit den folgenden Formeln in das planeozentrisch-kartesische Koordinatensystem überführt werden. Hierbei muss zuvor die numerische Exzentrizität e^2 und die Querkrümmung N des Ellipsoids berechnet werden:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad 3.21$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\varphi)}} \quad 3.22$$

a Große Halbachse des Ellipsoids

b Kleine Halbachse des Ellipsoids

$$a = b$$

Bei der Kugel:
 $N = R$ (Kugelradius)

Somit ergeben sich die Transformationsgleichungen zu:

$$X = (N + h) * \cos(\varphi * \cos(\lambda)) \quad 3.23$$

$$Y = (N + h) * \cos(\varphi) * \sin(\lambda) \quad 3.24$$

$$Z = (N * (1 - e^2) + h) * \sin(\varphi) \quad 3.25$$

h Höhe über dem Ellipsoid

φ Planetographische Breite

λ Planetographische Länge

3.1.3 Planetozentrisch-kartesische Koordinaten in lokales Tangentialsystem

Das lokale Tangentialsystem ist in einem Fundamentalpunkt gelagert, welcher in planetographischen Koordinaten φ_0 und λ_0 angegeben wird (vgl. Kapitel 2.2). Die Transformation der auf das Marszentrum bezogenen, kartesischen Koordinaten in das lokale Tangentialsystem wird mit folgender Gleichung vorgenommen:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A * \begin{pmatrix} X - X_{FP} \\ Y - Y_{FP} \\ Z - Z_{FP} \end{pmatrix} \quad 3.26$$

x, y, z Kartesische Koordinaten im lokalen System
 X, Y, Z Globale kartesische Koordinaten
 X_{FP}, Y_{FP}, Z_{FP} Globale kartesische Koordinaten des
 Fundamentalpunktes
 A Rotationsmatrix mit φ_0, λ_0 des Fundamentalpunktes

$$A = \begin{pmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\sin(\varphi_0)\cos(\lambda_0) & -\sin(\varphi_0)\sin(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) \\ \cos(\varphi_0)\cos(\lambda_0) & \cos(\varphi_0)\sin(\lambda_0) & \sin(\varphi_0) \end{pmatrix}$$

3.1.4 Transformation der Orientierungswinkel durch Komponentenvergleich

Die Winkel der äußeren Orientierung für die HRSC-Zeilenbilder beziehen sich auf das marsfeste planetozentrisch-kartesische Koordinatensystem. Für die weitere Auswertung müssen die Winkel $\varphi_C, \omega_C, \kappa_C$, genau wie die kartesischen Koordinaten X, Y, Z (vgl. Kapitel 3.1.3), in das lokale Tangentialsystem überführt werden.

Die Transformation der Winkel geschieht nach der Methode des Komponentenvergleichs (Jacobsen, 1997) und basiert auf den Formeln der Rotationsmatrix. Zum Beispiel ist bei der Rotationsreihenfolge ω, φ, κ die Matrixkomponente an der Position $M_{3,1}$ identisch mit $\sin(\varphi)$. Mit dem daraus resultierenden Wert von φ können weitere Werte berechnet werden.

Die Rotationsmatrix A für die Transformation in das lokale Tangentialsystem mit den planetographischen Koordinaten φ_0 und λ_0 des Fundamentalpunktes (Gleichung 3.26) muss mit der Rotationsmatrix der äußeren Orientierungswinkel $D(\varphi_C, \omega_C, \kappa_C)$ (vgl. Kapitel 3.1.1.1, Gleichung 3.1) multipliziert werden.

$$M = A * D \quad 3.27$$

Die Matrix D wird hier für die Drehreihfolge $\varphi_C, \omega_C, \kappa_C$ angegeben:

$$D = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_C)\cos(\kappa_C) + \sin(\varphi_C)\sin(\omega_C)\sin(\kappa_C) & -\cos(\varphi_C)\sin(\kappa_C) + \sin(\varphi_C)\sin(\omega_C)\cos(\kappa_C) & \sin(\varphi_C)\cos(\omega_C) \\ \cos(\omega_C)\sin(\kappa_C) & \cos(\omega_C)\cos(\kappa_C) & -\sin(\omega_C) \\ -\sin(\varphi_C)\cos(\kappa_C) + \cos(\varphi_C)\sin(\omega_C)\sin(\kappa_C) & \sin(\varphi_C)\sin(\kappa_C) + \cos(\varphi_C)\sin(\omega_C)\cos(\kappa_C) & \cos(\varphi_C)\cos(\omega_C) \end{pmatrix}$$

Die Orientierungswinkel, bezogen auf das lokale System, erhält man mit den Formeln 3.28, 3.29, 3.30 bei der für die Matrix R angegebenen Drehreihenfolge.

$$\varphi_L = \tan\left(\frac{M_{0,2}}{M_{2,2}}\right) \quad 3.28$$

$$\omega_L = \frac{\tan(-M_{1,2})}{\sqrt{1 - M_{1,2} * M_{1,2}}} \quad 3.29$$

$$\kappa_L = \tan\left(\frac{M_{1,0}}{M_{1,1}}\right) \quad 3.30$$

$\varphi_L, \omega_L, \kappa_L$	Winkel der äußeren Orientierung bezogen auf das lokale System
$M_{x,x}$	Elemente der Ergebnismatrix M aus Gleichung 3.27

3.2 Resampling

Eine Position im Bild wurde mit der in Kapitel 3.1.1.2 vorgestellten Transformationsmethode vom Objektkoordinatensystem in das Pixelkoordinatensystem ermittelt. Die Zeile y_{pi} und die Spalte x_{pi} geben die Position an. Nun soll ein Grauwert zugewiesen werden.

Im Allgemeinen nehmen die Werte für die Bildposition y_{pi} und x_{pi} aus der Transformation keine natürlichen Zahlen an. Die Bildinformation eines digitalen Bildes liegt aber ausschließlich in ganzzahligen Zeilenpositionen l und Spaltenpositionen s vor. Somit muss aus den umliegenden vier ganzzahligen Pixeln des Bildes ein Grauwert für die gefunden Position interpoliert werden. Bei diesem Resampling wird die bilineare Interpolation angewandt (Gleichung 3.31).

$$g(y_{pi}, x_{pi}) = g_{(l,s)} + (g_{(l+1,s)} - g_{(l,s)})dl + (g_{(l,s+1)} - g_{(l,s)})ds + (g_{(l,s)} - g_{(l+1,s)} - g_{(l,s+1)} + g_{(l+1,s+1)})dl ds \quad 3.31$$

3.3 Multi-Image Shape-from-Shading (MI-SFS)

Shape-from-Shading Verfahren (SFS) wurden seit den 1970er Jahren zunächst unabhängig voneinander in zwei wissenschaftlichen Zweigen entwickelt. Im Bereich der Planetenerkundung wurde in der Photoklinometrie die Modellierung von Reflexionseigenschaften von Oberflächen eingeführt. Die Oberflächenrekonstruktion aus Grauwertverteilungen digitaler Bilder stammt aus dem Bereich Computer Vision.

Allerdings gelten für beide Bereiche die gleichen Annahmen und Voraussetzungen, so dass bei der hier verwendeten Multi-Image Shape-from-Shading Methode die Ansätze beider Verfahren als Grundlage dienen. Eine Übersicht über bisherige Arbeiten im Bereich Shape-from-Shading findet sich bei Zhang et al. (1999).

Zur Modellierung von Digitalen Höhenmodellen aus Satelliten- und Luftbilddaten findet heute vornehmlich die digitale Bildzuordnung (Matching) Anwendung. Es werden hierbei identische Punkte in den Bilddaten zur Verknüpfung der Bildverbände herangezogen. Bei texturschwachen Geländeoberflächen ist ein solches Vorgehen schwierig oder gar nicht möglich. In diesen Gebieten wird die Geländeoberfläche nur schlecht modelliert, weil aus weit entfernten Matchingpunkten Höhen interpoliert werden müssen.

Die Multi-Image Shape-from-Shading Methode (MI-SFS) stellt ein Mittel zur Verfügung, hochauflösende Höhenmodelle aus texturschwachen Bilddaten zu modellieren und somit die bestehenden Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion in speziellen Regionen zu ergänzen (siehe Dorrer et al., 2005 und Lohse et al., 2006). Dabei wird die Geländeoberfläche aus den Helligkeitsverteilungen der Grauwerte in einem Bild modelliert und durch flächenhaft aneinander gefügte Ebenenstücke approximiert (Piechullek, 2000). Diese Ebenenstücke entsprechen genähert der in den Objektraum übertragenen Pixelgröße des digitalen Bildes. Für jedes Ebenenstück sollen die Neigungskomponenten in einem kartesischen Koordinatensystem in X- und Y-Richtung ermittelt werden. Diese können nicht direkt gemessen, sondern nur über die indirekte Messgröße der Bildgrauwerte berechnet werden. Eine eindeutige Lösung ist nur zu erzielen, wenn zusätzliche Bedingungen für die Form der Oberfläche eingeführt werden und Näherungswerte für die Unbekannten vorhanden sind.

Diese Vorbedingungen sind die Voraussetzung für die Oberflächenrekonstruktion:

- Es wird davon ausgegangen, dass die zu rekonstruierende Oberfläche stückweise glatt ist und keine Bruchkanten oder Diskontinuitäten aufweist.
- Jeder Punkt des Auswertungsgebiets muss in allen Bildern sichtbar sein. Es dürfen also keine Verdeckungen auftreten.

- Das Reflexionsverhalten der Oberfläche ist für die Aufnahmedauer eines Bildes und im gesamten Auswertungsgebiet gleich. Für Zeilenbilddaten gilt diese Annahme ebenfalls für die Dauer der Aufnahme des Auswertungsgebiets; also für alle Zeilenbilder, die das Gebiet abbilden.
- Die Methode kann nur mit Bilddaten arbeiten, die texturschwache Gebiete abbilden. Da in Bildern von der Erdoberfläche meist viel Textur durch Bebauung und Vegetation vorhanden ist, gibt es auf der Erde wenige Anwendungsmöglichkeiten. In Gebieten, wie zum Beispiel Wüstenregionen, funktioniert MI-SFS auch auf der Erde. Das Haupteinsatzfeld der Methode liegt allerdings in der Planetologie.

3.3.1 Bildentstehung

Abbildung 3.5 zeigt schematisch die Entstehung der Grauwerte eines digitalen Bildes. Es treten hauptsächlich vier Einflussgrößen auf:

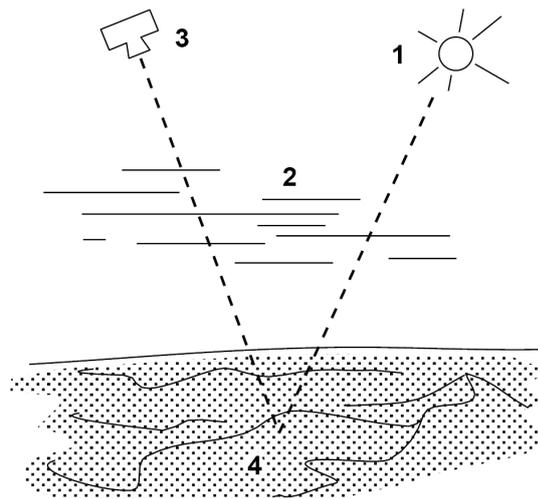


Abbildung 3.5 Einflüsse bei der Grauwertentstehung

Ausgehend von der Beleuchtungsquelle 1 durchdringt die elektromagnetische Strahlung die Atmosphäre 2, trifft auf die Geländeoberfläche 4, wird dort teilweise reflektiert, durchdringt ein zweites Mal die Atmosphäre und wird vom Sensor 3 empfangen.

Die verfügbare Beleuchtungsquelle für die Aufnahme von Luft- und Satellitenbildern ist die Sonne. Die Beleuchtungsstärke und die Position der Sonne tragen maßgeblich zur Grauwertbildung bei. Da die Entfernung der Sonne zu den Planeten sehr groß ist, wird von einer punktförmigen, weit entfernten Beleuchtungsquelle ausgegangen. Die Strahlenbündel, die auf der Oberfläche eintreffen, werden somit als parallel angenommen (Piechullek, 2000). Die Position der Sonne zum Aufnahmezeitpunkt kann berechnet werden und wird als bekannt vorausgesetzt.

Die Parameter der Atmosphäre sind aufgrund ihrer Komplexität nicht bekannt. Streuprozesse werden nicht berücksichtigt und es wird kein Atmosphärenmodell herangezogen. Bei Auswertungen von Oberflächen, die von einer Atmosphäre überdeckt werden, kann es daher zu systematischen Fehlern kommen.

Die Sensorparameter setzen sich aus geometrischen und radiometrischen Größen zusammen. Die geometrischen Eigenschaften eines Sensors werden durch die innere Orientierung, bekannt aus der Sensorkalibrierung, und der äußeren Orientierung, bekannt aus einer Bündelblockausgleichung oder direkten Messungen, beschrieben. Die radiometrischen Parameter des Sensors haben bei SFS einen besonders hohen Stellenwert. Die exakte Oberflächenrekonstruktion kann nur dann erfolgen, wenn die Bildgrauwerte auf die aus dem Objektraum einfallende Strahldichte zurückgeführt werden können (Piechullek, 2000). Da auch die radiometrischen Kalibrierungsparameter des Sensors berechnet werden können, kann der gesamte Einfluss des Aufnahmesensors als bekannt angenommen werden.

Die Geländeoberfläche reflektiert die einfallende Strahlung teilweise. In welcher Weise das Gelände die Strahlung reflektiert und absorbiert hängt von der Materialzusammensetzung der Oberfläche ab. Bei der MI-SFS Methode wird davon ausgegangen, dass die Materialzusammensetzung einer zu rekonstruierenden Oberfläche im gesamten Gebiet einheitlich ist. Somit wird angenommen, dass auch die Reflexion überall gleich ist.

Das wahre Reflexionsverhalten einer Oberfläche ist nicht bekannt und muss daher unter Berücksichtigung der Aufnahmekonfiguration durch Reflexionsmodelle beschrieben werden. Durch die richtige Wahl eines solchen Modells kann die topographiebedingte Grauwertänderung ermittelt werden. Hierbei kann ein fehlerhaftes Modell zu systematischen Fehlern führen. Eine Beschreibung der verwendeten Reflexionsmodelle folgt in Kapitel 3.3.3. Darüber hinaus ist die Form der Geländeoberfläche unbekannt. Diese soll durch die SFS Methode ermittelt werden.

3.3.2 Die Albedo

Die SFS Methode leitet aus den Helligkeitsvariationen der Bildgrauwerte die Lage der Oberflächenelemente, bezogen auf die Beleuchtungsrichtung, ab. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Oberflächenelemente, die von der Beleuchtungsquelle weggeneigt sind, im Bild dunkler dargestellt werden als Oberflächenelemente, welche der Beleuchtungsquelle zugeneigt sind. Das Prinzip entspricht der in der Kartographie verwendeten Schummerung.

Die Größe des Bildgrauwertes hängt also entscheidend von drei Raumvektoren ab, die in Abbildung 3.6 dargestellt sind:

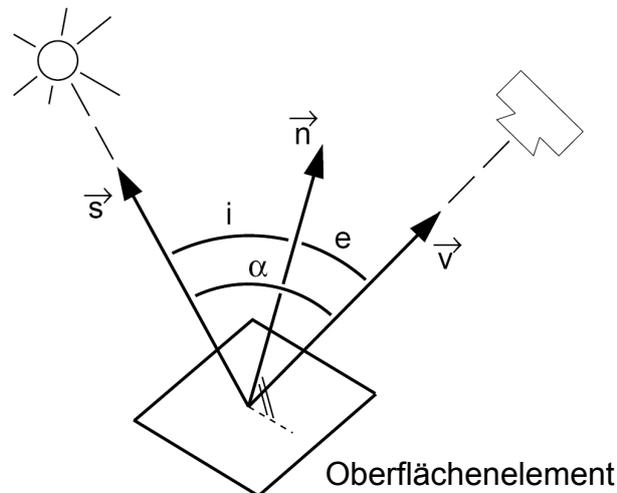


Abbildung 3.6 Flächennormale, Beleuchtungsrichtung und Beobachtungsrichtung

- Von der Flächennormalen \vec{n} . Sie wird durch zwei unabhängige Neigungsvektoren beschrieben, die sich in der gewählten Tangentialebene befinden und parallel zur X- und Y-Achse des lokalen Systems liegen. Auf diese Neigungsvektoren wird später beim geometrischen Oberflächenmodell (Kapitel 3.3.5) noch eingegangen.
- Vom Beleuchtungsvektor \vec{s} . Er zeigt zur punktförmigen unendlich weit entfernten Lichtquelle (Sonne), so dass für jeden Punkt des Gebietes die gleiche Beleuchtungsrichtung angenommen werden kann.
- Dem Beobachtungsvektor \vec{v} . Dieser Vektor ist zum Projektionszentrum des Aufnahmesensors gerichtet.

Aus diesen drei Vektoren ergibt sich der Einfallswinkel i zwischen \vec{n} und \vec{s} , der Ausfallswinkel e zwischen \vec{n} und \vec{v} sowie der Phasenwinkel α zwischen \vec{s} und \vec{v} .

Die Definition der Albedo A ist das Verhältnis der Strahlung, welche im Winkel i auf die Oberfläche auftrifft und der Anteil der Strahlung, welcher von den Oberflächenelementen reflektiert wird. Die Albedo A nimmt Werte im Bereich von 0.0 bis 1.0 an. Sie gibt die Gesamthelligkeit des Gebietes an. Die SFS Methode setzt voraus, dass die Albedo A für das gesamte Auswertungsgebiet gleich ist. Beim Auftreten lokaler Albedovariationen kann es zu systematischen Fehlern kommen.

3.3.3 Reflexionsmodelle

Im Gegensatz zur Albedo, welche die reflektierte Strahlung der Oberfläche in ihrer Gesamtheit beschreibt, gibt die bidirektionale Reflektanz r (BDR) das Verhältnis zwischen der in Sensorrichtung reflektierten Strahldichte L_e und der eintreffenden Bestrahlungsstärke E_0 wieder. Die BDR ist abhängig vom Einfallswinkel, Ausfallswinkel und Phasenwinkel.

$$r(i, e, \alpha) = \frac{L_e(i, e, \alpha)}{E_0} \quad 3.32$$

$r(i, e, \alpha)$	bidirektionale Reflektanz
L_e	Strahldichte [$\frac{W}{m^2 sr}$]
E_0	Bestrahlungsstärke [$\frac{W}{m^2}$]

Die BDR dient als Grundlage für die mathematische Beschreibung der Reflexionsmodelle.

3.3.3.1 Lambert-Gesetz

Das Lambert-Reflexionsmodell beschreibt eine Oberfläche, bei der die einfallende Bestrahlungsstärke E_0 von der Oberfläche diffus reflektiert wird. Die Strahldichte L_e ist bezüglich der reflektierten Richtung konstant. Die Formel für die BDR lautet:

$$r(i) = A_L(X, Y) * \cos i \quad 3.33$$

A_L	Lambert-Albedo
i	Einfallswinkel

Da die einfallende Strahlung in alle Richtungen gleichmäßig reflektiert wird, ist die BDR ausschließlich vom Einfallswinkel i abhängig. Es gibt zwar keine natürliche Oberfläche, die mit diesem sehr einfachen Modell exakt beschrieben werden kann, jedoch ergeben sich für helle, feinkörnige Oberflächen mit diesem Modell sehr gute Ergebnisse (Piechullek, 2000). Die nachfolgende Abbildung 3.7 visualisiert das Lambert-Modell für eine Albedo von 1 und zeigt deutlich die Abhängigkeit von i .

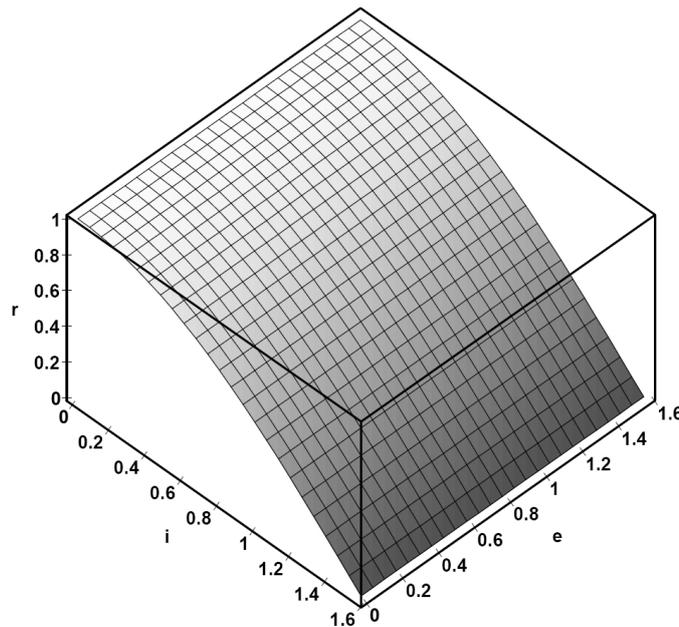


Abbildung 3.7 Lambert-Reflexion

3.3.3.2 Lommel-Seeliger-Gesetz

Das Lommel-Seeliger-Gesetz beschreibt die Reflexion an einer Oberfläche, die von isotropen, voneinander isolierten Streuzentren ausgeht (Piechullek, 2000). Der Sensor empfängt nur die Strahldichte der Streuzentren, die in seinem Gesichtsfeld liegen. Somit ist, wie in Gleichung 3.34 ersichtlich, das Modell von dem Einfallswinkel i sowie dem Ausfallswinkel e abhängig.

$$r(i,e) = A_{LS}(X,Y) * \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \quad 3.34$$

A_{LS} Lommel-Seeliger-Albedo

Bei größerem Ausfallswinkel wird ein größeres Oberflächenstück vom Gesichtsfeld des Sensors abgedeckt. Mehr Streuzentren in diesem Oberflächenstück führen bei gleichbleibender Bestrahlungsstärke E_0 zu einer Helligkeitssteigerung. Im Gegensatz zum Lambert-Gesetz können mit dem Lommel-Seeliger-Gesetz dunkle Oberflächen gut beschrieben werden; Abbildung 3.8 verdeutlicht dies:

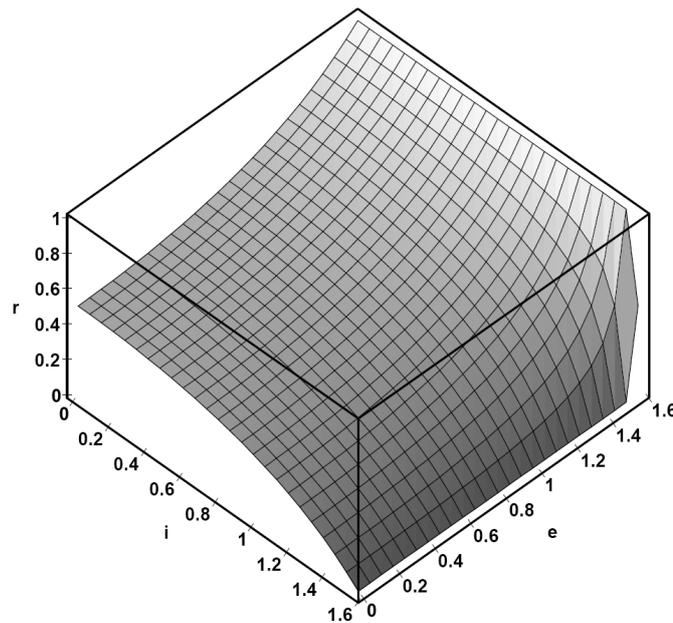


Abbildung 3.8 Lommel-Seeliger-Reflexion

3.3.3.3 Lunar-Lambert-Gesetz

Um die Vorteile des Lambert- sowie des Lommel-Seeliger-Ansatzes gemeinsam nutzen zu können, wurde das Lunar-Lambert-Gesetz entwickelt (McEwen, 1991). Es stellt eine Linearkombination der beiden Reflexionsgesetze dar und ermöglicht somit die einfache Beschreibung von planetaren Oberflächen.

$$r(i,e,\alpha) = A_N(X,Y,\alpha) * [2 * \Lambda(\alpha) * \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} + (1 - \Lambda(\alpha)) * \cos i] \quad 3.35$$

A_N , die Normalalbedo, entspricht der BDR bei vertikaler Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung und gibt die Gesamthelligkeit der Oberfläche an. Sie ist, ebenfalls wie A_L und A_{LS} , abhängig von der Position X , Y und zusätzlich vom Phasenwinkel α . Bei der Verwendung mehrerer Bilder unterscheiden sich die Beleuchtungsrichtungen sowie die Beobachtungsrichtungen von Bild zu Bild. Dies führt dazu, dass die gleiche Oberfläche unterschiedlich hell abgebildet wird. Somit hat jedes Bild eine eigene Albedo A_N .

$\Lambda(\alpha)$ ist ein empirisch ermittelter Wert zwischen 0.0 und 1.0, der die Gewichtung zwischen den beiden Reflexionsmodellen steuert. $\Lambda(\alpha) = 0.0$ bedeutet Lambert und $\Lambda(\alpha) = 1.0$ Lommel-Seeliger Modell.

Wie aus den Visualisierungen der beiden Reflexionsmodelle ersichtlich (vgl. Abbildungen 3.7, 3.8), nimmt die BDR bei einer Aufnahmeconfiguration mit den

Winkeln $i=e=\alpha=0^\circ$ (senkrechte Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung) beim Lommel-Seeliger-Gesetz genau die Hälfte des BDR-Wertes des Lambert-Gesetzes an. Aus diesem Grund wird der Lommel-Seeliger-Term mit dem Multiplikationsfaktor 2 versehen.

Das Lunar-Lambert-Gesetz wird, aufgrund seiner guten Eignung zur Beschreibung des Reflexionsverhaltens von planetaren Oberflächen, im Weiteren als Modell für MI-SFS verwendet.

3.3.4 Kameragleichung

Die Grundlage der Oberflächenrekonstruktion mit MI-SFS bilden die digitalen Bildgrauwerte. Wie bereits zu Beginn des Kapitels 3.3 erläutert, wird mit Hilfe der Helligkeitsverteilungen in den Bildern die Geländeform abgeleitet. Die mathematische Beschreibung der Grauwertentstehung ist die Basis dieser Methode.

Ein Grauwert $G(x',y')$ im Bildpunkt $P(x',y')$ ergibt sich maßgeblich aus der Bestrahlungsstärke $E_B(x',y')$. Gleichung 3.36 stellt den Zusammenhang zwischen $E_B(x',y')$ und der vom Objektpunkt $P(X,Y,Z)$ in Richtung Sensor ausgestrahlten Strahldichte $L_e(i,e,\alpha)$ her:

$$G(x',y') = k * E_B(x',y') = k * \left[\frac{\pi}{4} * \left(\frac{d}{f}\right)^2 * \cos^a \gamma * L_e(i,e,\alpha) \right] \quad 3.36$$

$G(x',y')$	Modellgrauwert im Bildpunkt $P'(x',y')$
$E_B(x',y')$	Eintreffende Bestrahlungsstärke im Bildpunkt $P'(x',y')$
k	Skalierungsfaktor für die Umwandlung reeller Bestrahlungsstärken in ganzzahlige Grauwerte $g(x',y')$
f	Brennweite
d	Blendendurchmesser
a	Exponent des Lichtabfalls
γ	Bildwinkel
$L_e(i,e,\alpha)$	Strahldichte, die in Richtung des Sensors reflektiert wird

Durch den Faktor k werden die registrierten Bestrahlungsstärken in ganzzahlige Graustufen unterteilt. Die Brennweite und der Blendendurchmesser sind durch die Bauform der Kamera gegeben. Der Lichtabfall a kann durch eine radiometrische Vorverarbeitung der Bilddaten bestimmt werden, da der Bildwinkel γ für jedes Pixel aus einer geometrischen Sensorkalibrierung bekannt ist.

Die Strahldichte $L_e(i, e, \alpha)$ erhält man durch Umstellen der Gleichung 3.32:

$$L_e(i, e, \alpha) = E_0 * r(i, e, \alpha) \quad 3.37$$

Einsetzen der Gleichung 3.37 in 3.36 ergibt:

$$G(x', y') = k * \left[\frac{\pi}{4} * \left(\frac{d}{f} \right)^2 * \cos^a \gamma * E_0 * r(i, e, \alpha) \right] \quad 3.38$$

Für die bidirektionale Reflektanz wird das Lunar-Lambert-Modell mit Gleichung 3.35 verwendet:

$$\begin{aligned} G(x', y') &= k * E_B(x', y') \\ &= k * \left[\frac{\pi}{4} * \left(\frac{d}{f} \right)^2 * \cos^a \gamma * E_0 * A_N * \left(2 * \Lambda(\alpha) * \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} + (1 - \Lambda(\alpha)) * \cos i \right) \right] \end{aligned} \quad 3.39$$

Die konstanten Werte aus der Sensorkalibrierung sowie die Bestrahlungsstärke E_0 werden mit der Normalalbedo A_N zu einem Parameter zusammengefasst.

Die zusammengefasste Gleichung lautet dann:

$$G(x', y') = A_N * \left[2 * \Lambda(\alpha) * \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} + (1 - \Lambda(\alpha)) * \cos i \right] \quad 3.40$$

Mit dieser Kameragleichung wird der Zusammenhang zwischen den Parametern der Oberfläche und den in den Bildern registrierten Grauwerten über das Lunar-Lambert-Gesetz hergestellt. Der Abbildungsvorgang soll anschließend in einem kartesischen Objektkoordinatensystem beschrieben werden und ein Zusammenhang mit dem Reflexionsverhalten der Oberfläche hergestellt werden. Hierfür wird zunächst ein geometrisches Oberflächenmodell benötigt.

3.3.5 Geometrisches Oberflächenmodell

Zur Modellierung der Oberfläche wird ein digitales Geländemodell mit gleichmäßiger rechtwinkliger Gitterstruktur gewählt. Jeder Maschenpunkt (X_k, Y_l) erhält eine unabhängige Höhe $Z_{k,l}$, wobei k die Spalte und l die Zeile angibt (Abbildung 3.9).

Für beliebige Positionen zwischen vier Maschenpunkten kann mit einer bilinearen Interpolation die Höhe ermittelt werden:

$$Z = Z_{k,l} + (Z_{k+1,l} - Z_{k,l})dX + (Z_{k,l+1} - Z_{k,l})dY + (Z_{k,l} - Z_{k+1,l} - Z_{k,l+1} + Z_{k+1,l+1})dXdY$$

3.41

$$dX = X - X_k \quad dY = Y - Y_l$$

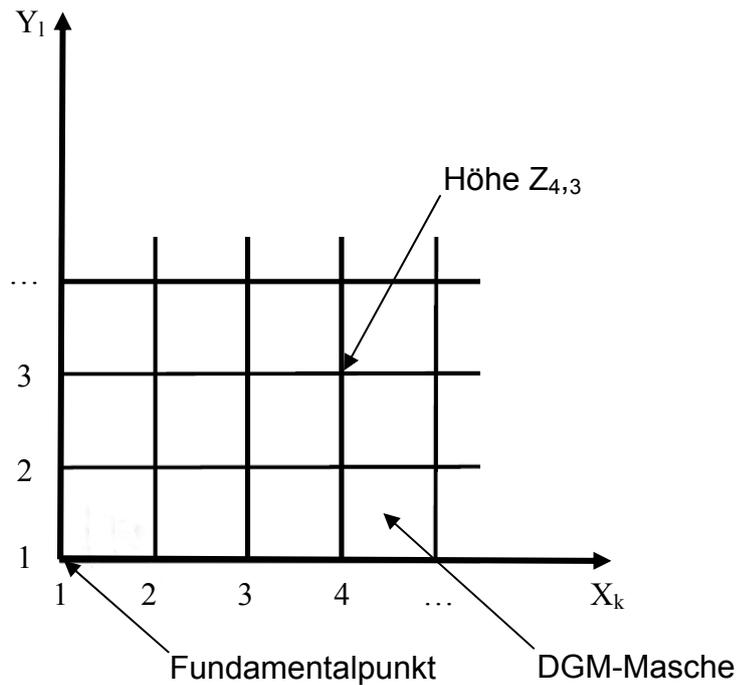


Abbildung 3.9 Geometrisches Oberflächenmodell

Als Maschenweite wird ein Vielfaches n der in den Objektraum übertragenen Pixelgröße gewählt. Somit liegen genähert $n \times n$ Rasterlemente innerhalb einer Masche.

Der Einfallswinkel i , der Ausfallswinkel e und der Phasenwinkel α sollen im kartesischen Objektkoordinatensystem beschrieben werden. Die Raumwinkel können durch die gegebenen Vektoren berechnet werden:

$$i = \arccos \frac{\vec{n} \cdot \vec{s}}{|\vec{n}| |\vec{s}|}$$

$$e = \arccos \frac{\vec{n} \cdot \vec{v}}{|\vec{n}| |\vec{v}|}$$

$$\alpha = \arccos \frac{\vec{s} \cdot \vec{v}}{|\vec{s}| |\vec{v}|}$$

3.42

Der Normalenvektor \vec{n} eines Oberflächenelements kann nun durch die zwei Neigungskomponenten n_x und n_y beschrieben werden, die sich aus der partiellen Ableitung der Gleichung 3.41 nach X und Y ergeben:

$$n_x = \frac{\partial Z}{\partial X} = Z_{k+1,l} - Z_{k,l} + (Z_{k,l} - Z_{k+1,l} - Z_{k,l+1} + Z_{k+1,l+1})dY$$

3.43

$$n_y = \frac{\partial Z}{\partial Y} = Z_{k,l+1} - Z_{k,l} + (Z_{k,l} - Z_{k+1,l} - Z_{k,l+1} + Z_{k+1,l+1})dX$$

Der Normalenvektor in einem Punkt $Z(X,Y)$ lässt sich somit als Funktion der umliegenden Gitterhöhen $Z_{k,l} = Z(X_k, Y_l)$ im Objektkoordinatensystem formulieren (Piechullek, 2000).

3.3.6 Radiometrisches Oberflächenmodell

Ein Pixel im Bild stellt ein Teil der Oberfläche des Aufnahmegebiets dar. Jede Masche des geometrischen Oberflächenmodells kann in gleich große Rasterelemente unterteilt werden, die annähernd der Pixelgröße, projiziert in den Objektraum, entsprechen. Allen Rasterelementen, die aus demselben Bild abgeleitet sind, wird eine gleiche Normalalbedo A_N zugewiesen (siehe Abbildung 3.10).

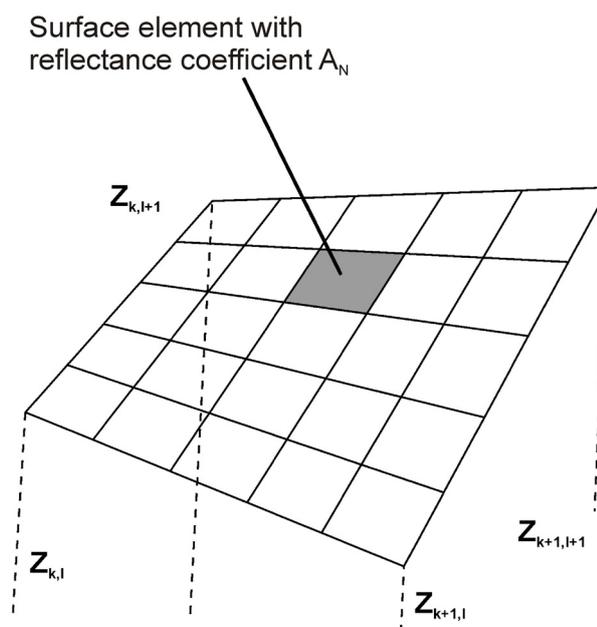


Abbildung 3.10 Radiometrisches Oberflächenmodell

Der Gewichtungsfaktor $\lambda(\alpha)$ des Lunar-Lambert-Gesetzes wird als bekannt vorausgesetzt und soll für das ganze Bild gleich sein. Somit hat die gesamte Oberfläche des Auswertungsgebietes, die in einem Bild dargestellt ist, ein einheitliches Reflektionsverhalten. A_N wird als unbekannt angesehen und wird bei der Oberflächenrekonstruktion mitbestimmt.

3.3.7 Ausgleichungsansatz

Die Verknüpfung der Bildgrauwerte mit dem geometrischen und radiometrischen Oberflächenmodell wird über die Kameragleichung 3.40 vorgenommen. Die ermittelten Modellgrauwerte $G_j(\hat{Z}_{k,l}, \hat{A}_N(\alpha_j))$ sollen den im Bild registrierten Grauwerten $g_j(x'_j, y'_j)$ entsprechen ($j = \text{Bildnummer}$).

Dabei muss einem Mittelpunkt eines Rasterelements des Oberflächenmodells ein Bildgrauwert zugewiesen werden. Der Objektpunkt wird mit Hilfe der Kollinearitätsgleichung oder, bei Zeilenbildkameras, mit der erweiterten Kollinearitätsgleichung (vgl. Kapitel 3.1.1.1) in Bildkoordinaten und anschließend in Pixelkoordinaten transformiert. Durch das Resampling (vgl. Kapitel 3.2) kann für die reellen Abtastkoordinaten ein Grauwert aus den umliegenden Bildgrauwerten interpoliert werden.

Als Unbekannte gelten die Höhen der Maschenecken des geometrischen Oberflächenmodells $\hat{Z}_{k,l}$ sowie die Normalalbedo $\hat{A}_N(\alpha_j)$ für jedes Bild. Für alle Unbekannten müssen in die Ausgleichung Näherungswerte eingeführt werden. Mit den Näherungshöhen für jede Maschenecke werden die Rasterelemente in die Bilder transformiert. Die mit Gleichung 3.40 ermittelten Modellgrauwerte werden noch nicht mit dem interpolierten Grauwert aus dem Resampling übereinstimmen. Durch das iterative Anpassen der Näherungswerte werden andere Positionen im Bild ermittelt und somit auch andere Bildgrauwerte interpoliert.

Die Iteration wird fortgeführt, bis die Abweichungen zwischen den Modellgrauwerten $G_j(\hat{Z}_{k,l}, \hat{A}_N(\alpha_j))$ und Bildgrauwerten $g_j(x'_j, y'_j)$ minimal sind. Die Verknüpfung von mehreren Bildern erfolgt über das geometrische Oberflächenmodell.

Die Verbesserungsgleichung für die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate lautet:

$$v = G_j(\hat{Z}_{k,l}, \hat{A}_N(\alpha_j)) - g_j(x'(\hat{Z}_{k,l}), y'(\hat{Z}_{k,l})) \quad 3.44$$

Da zwischen den Bildgrauwerten $g_j(x'_j, y'_j)$ und den Unbekannten $\hat{Z}_{k,l}$ und $\hat{A}_N(\alpha_j)$ ein nichtlinearer Zusammenhang besteht, muss die Gleichung 3.40 für die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate linearisiert werden. Dies ist mit der Entwicklung einer Taylorreihe möglich:

$$\begin{aligned} \hat{v}_j = & \left[\frac{\partial G_j}{\partial Z_{k,l}} - \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k,l}} \right] \Delta \hat{Z}_{k,l} + \left[\frac{\partial G_j}{\partial Z_{k+1,l}} - \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k+1,l}} \right] \Delta \hat{Z}_{k+1,l} + \\ & \left[\frac{\partial G_j}{\partial Z_{k,l+1}} - \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k,l+1}} \right] \Delta \hat{Z}_{k,l+1} + \left[\frac{\partial G_j}{\partial Z_{k+1,l+1}} - \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k+1,l+1}} \right] \Delta \hat{Z}_{k+1,l+1} + \\ & \frac{\partial G_j}{\partial A_N} \Delta \hat{A}_N(\alpha_j) - [g_j^0 - G_j^0] \end{aligned} \quad 3.45$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{Z}_{k,l} &= \hat{Z}_{k,l} - Z_{k,l}^0 & \Delta \hat{Z}_{k+1,l}, \Delta \hat{Z}_{k,l+1}, \Delta \hat{Z}_{k+1,l+1} & \text{entsprechend} \\ \Delta \hat{A}_N(\alpha_j) &= \hat{A}_N(\alpha_j) - A_N^0 \end{aligned}$$

Die Differentiale

$$\frac{\partial G_j}{\partial Z_{k,l}}, \frac{\partial G_j}{\partial A_N}$$

werden aus der Gleichung 3.40 ermittelt und die Differentiale

$$\frac{\partial g_j}{\partial Z_{k,l}}, \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k+1,l}}, \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k,l+1}}, \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k+1,l+1}}$$

müssen durch fortgesetztes Anwenden der Kettenregel auf die Höhen $Z_{k,l}$ zurückgeführt werden:

$$\frac{\partial g_j}{\partial Z_{k,l}} = \left[\frac{\partial g_j}{\partial l'_j} \left(\frac{\partial l'_j}{\partial x'_j} \frac{\partial x'_j}{\partial Z} + \frac{\partial l'_j}{\partial y'_j} \frac{\partial y'_j}{\partial Z} \right) + \frac{\partial g_j}{\partial s'_j} \left(\frac{\partial s'_j}{\partial x'_j} \frac{\partial x'_j}{\partial Z} + \frac{\partial s'_j}{\partial y'_j} \frac{\partial y'_j}{\partial Z} \right) \right] \frac{\partial Z}{\partial Z_{k,l}} \quad 3.46$$

$$\frac{\partial g_j}{\partial Z_{k+1,l}}, \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k,l+1}}, \frac{\partial g_j}{\partial Z_{k+1,l+1}} \text{ entsprechend}$$

$\frac{\partial g_j}{\partial l'_j}, \frac{\partial g_j}{\partial s'_j}$ Sind die Komponenten des Grauwertgradienten in Richtung der Koordinatenachsen des Pixelkoordinatensystems und ergeben sich aus dem Resampling (siehe Kapitel 3.2)

$\frac{\partial l'_j}{\partial x'_j}, \frac{\partial l'_j}{\partial y'_j}, \frac{\partial s'_j}{\partial x'_j}, \frac{\partial s'_j}{\partial y'_j}$ Ergeben sich aus den Formeln 3.19, 3.20 aus Kapitel 3.1.1.4

$\frac{\partial x'_j}{\partial Z}, \frac{\partial y'_j}{\partial Z}$ Sind die Differentiationsquotienten der Kollinearitätsgleichung aus Kapitel 3.1.1.1

$\frac{\partial Z}{\partial Z_{k,l}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_{k+1,l}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_{k,l+1}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_{k+1,l+1}}$ Ergeben sich durch Differentiation der Gleichung zur bilinearen Interpolation 3.41 und sind für jedes Oberflächenelement konstant

Das lineare Gleichungssystem lässt sich nun in Matrixschreibweise ausdrücken:

$$\hat{v} = A x - l \tag{3.47}$$

\hat{v} Verbesserungsvektor
 A Koeffizientenmatrix mit partiellen Ableitungen der Verbesserungsgleichung nach den Unbekannten
 x Unbekanntenvektor mit Zuschlägen für die Höhen der Maschenecken $\Delta \hat{Z}_{k,l}$ und die Normalalbedo $\Delta \hat{A}_N(\alpha_j)$
 l Widerspruchsvektor

Zur Berechnung der Unbekannten und der zugehörigen Kovarianzen werden folgende Gleichungen verwendet:

$$x = Q_{xx} A^T P l \quad \text{mit } Q_{xx} = (A^T P A)^{-1}$$

$$\hat{x} = x^0 + x$$

$$\hat{v} = A x - l$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\hat{v}^T P \hat{v}}{n - u}$$

$$K = \sigma_0^2 Q_{xx}$$

x	Vektor der Unbekanntenzuschläge
\hat{x}	Vektor der Unbekannten
\hat{v}	Vektor der Verbesserungen
σ_0^2	Kovarianzfaktor
n	Anzahl der Beobachtungen
u	Anzahl der Unbekannten
K	Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Unbekannten

Den Aufbau der Normalgleichungsmatrix $A^T P A$ zeigt Abbildung 3.11. Nur benachbarte DGM-Maschenhöhen werden miteinander in Beziehung gesetzt. Der Rand beinhaltet die Normalalbedos $\hat{A}_N(\alpha_j)$

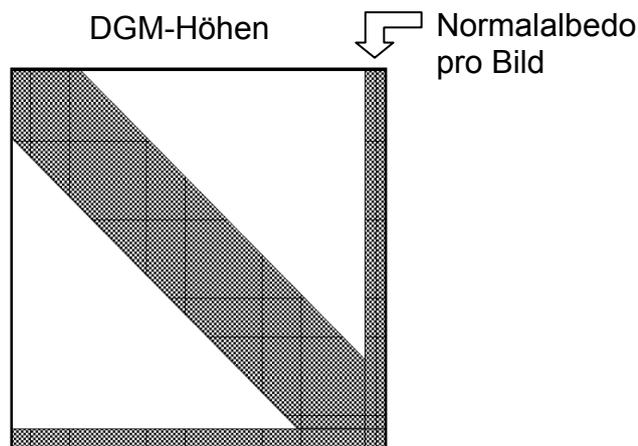


Abbildung 3.11 Normalgleichungsmatrix $A^T P A$

4 Implementierung der Zeilenbildgeometrie in das Programm „MI-SFS“

4.1 Ausgangsprogramm und Programmerweiterung

Das Ausgangsprogramm ist ein in C++ geschriebenes Multi-Image Shape-from-Shading-Programm, welches unter dem Betriebssystem Linux läuft. Bisher können Bilddaten der Clementine-Mission der NASA zur Oberflächenrekonstruktion verwendet werden. Der Orbiter der Clementine-Mission erreichte 1994 den Erdenmond und lieferte zahlreiche hochauflösende, panchromatische Bilder der Mondoberfläche (siehe auch Eliason, 2006). Das Programm arbeitet ausschließlich mit Bilddaten von Flächensensoren im raw-Format. Parameter werden aus Textdateien eingelesen, ebenso müssen das Näherungs- sowie das Referenz-DGM als Textdatei zur Verfügung stehen. Alle Funktionen zur Auswertung von Clementine-Bilddaten sollen auch weiterhin nutzbar bleiben.

Die Verarbeitung von HRSC-Daten, zum Beispiel mit dem Matching-Programm HWMATCH1 des IPI, Universität Hannover, wird mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems VICAR (Video Image Communication And Retrieval) realisiert. Das zu erweiternde MI-SFS Programm soll ebenfalls unter VICAR laufen (VICAR-Online-Manual: Duxbury, Jensen, 1994). Somit ist gewährleistet, dass die Eingabedaten nach den gleichen Konventionen eingelesen und verarbeitet werden, unabhängig von der Mission oder Art der verwendeten Daten. Dabei stellt die Umstellung des Bildformats zum VICAR-Format die wichtigste Änderung dar. Es können die vorhandenen raw-Bilder problemlos mit einem separaten Programm in das VICAR-Format konvertiert und bildspezifische Labelinformationen ergänzt werden.

Das VICAR-Bildverarbeitungssystem stellt spezielle C-Funktionen zum Anlegen, Editieren und Auslesen von Bilddaten, Bildlabelinformationen und Eingabeparametern zur Verfügung. Alle entsprechenden Abschnitte im Quellcode, die Daten für MI-SFS einlesen, werden dahingehend angepasst oder vollständig ersetzt.

Um Bilddaten verschiedener Missionen mit dem gleichen Programm auswerten zu können, ist es notwendig, eine interne Programmsteuerung einzubauen, die dafür sorgt, dass für jeden Bildtyp die richtigen Funktionen ausgeführt werden. Diese Steuerung soll von Programmbeginn an ohne Eingriff des Operators erfolgen. Zur Unterscheidung der Bilddaten wird der Missionsname als Eingabeparameter übergeben und zur Vermeidung von Fehlern beim Programmstart mit den Angaben in den Bildlabeln verglichen.

Das bestehende MI-SFS Programm soll dahingehend erweitert werden, dass Bilddaten der HRSC-Kamera der Mars Express Mission verarbeitet werden

können. Der wesentliche Unterschied zwischen den Clementine-Bilddaten und den Bildern der Mars Express Mission besteht in der Aufnahmegeometrie. Die Clementine-Bilder wurden von einem digitalen Flächensensor aufgezeichnet, wohingegen die HRSC-Kamera einzelne Zeilenbilder aufnimmt, die pro Kanal zu einem Bildstreifen zusammengefügt werden. Bei den Clementine-Bildern gibt es pro Bild nur eine äußere Orientierung, die von Programmbeginn an feststeht; bei HRSC-Bildstreifen gibt es für jede Bildzeile eine äußere Orientierung, die dynamisch im Programmablauf bestimmt werden muss. Aufgrund dieser wesentlich verschiedenen Eigenschaften der HRSC-Daten muss die Verarbeitung der Bilddaten im gesamten Programmablauf angepasst werden.

In diesem Kapitel sollen zunächst die Eingabedaten, welche für die Auswertung von HRSC-Bildern nötig sind und die Ausgabedaten des MI-SFS Programms vorgestellt werden. Die Ausgabedaten sind gleichermaßen für die Auswertung von Clementine-Bildern gültig. Es wird die neu organisierte Parameterübergabe erläutert und ein Ablaufplan des Programms dargestellt. Im letzten Abschnitt wird speziell auf die wichtigsten, neu programmierten Funktionen und Programmiererweiterungen eingegangen.

4.2 Eingabedaten

4.2.1 HRSC Bildstreifen

Die Zeilenbilder der High Resolution Stereo Camera liegen als Bildstreifen im VICAR-Format vor (Deen, 1992). Die nacheinander aufgenommenen Zeilenbilder werden in einem Bildstreifen zusammengefügt, wobei aus jedem Aufnahmekanal ein eigener Bildstreifen erzeugt wird. Somit liefert ein HRSC-Orbit neun Bildstreifen mit nahezu identischer Gebietsabdeckung. Abbildung 4.1 verdeutlicht die Organisation der Bilddaten im hier verwendeten BSQ-Format (Band SeQuential). In dieser Arbeit wird ausschließlich ein Band verwendet.

Zusätzlich zur so gespeicherten Bildinformation enthält das VICAR-Bild einen Header mit Labelinformationen. Ein Wert im Label wird jeweils einem definierten Keyword zugeordnet und kann somit eindeutig identifiziert und abgerufen werden (z. B. FORMAT='REAL'). Dieses Label unterteilt sich in die drei Abschnitte „System Labels“, „Property Labels“ und „History Labels“. Das System Label stellt Informationen zu Bildformat, Speicherart, Größe des Bildes etc. zur Verfügung. Zusätzliche Informationen über den Orbit, die Kamera, den Kanal sowie die Bilddatei sind im Property Label zu finden. Zuletzt kann an Hand des History Labels Erzeugung und Änderung des Bildinhaltes nachvollzogen werden.

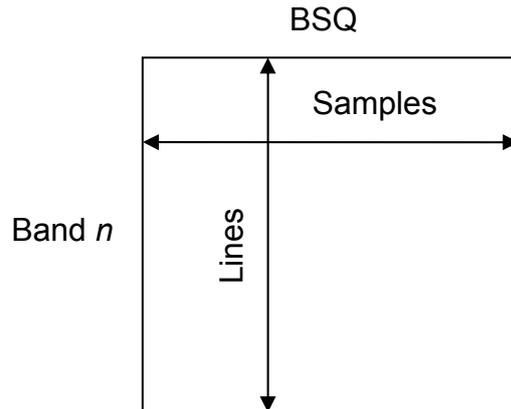


Abbildung 4.1 Bilddaten im Band Sequential Format

Für MI-SFS werden radiometrisch kalibrierte Bilder verwendet. Die Kalibrierung nach Gleichung 4.1 wird in Level 2 der HRSC-Prozessierungskette vorgenommen (vgl. Kapitel 2.3). Die spektrale Strahlendichte g_{cal} hat die Einheit $[W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}]$.

$$g_{cal} = g * \frac{RADIANCE_SCALING_FACTOR + RADIANCE_OFFSET}{BANDWIDTH} \quad 4.1$$

Beispiel HRSC-Orbit 1235, Nadirkanal:

$$g_{cal} = g * \frac{0.127988 + 0.0}{177.0}$$

4.2.2 Extori-Files

Zu jedem HRSC-Bildstreifen gehört ein Extori-File, welches für jedes im Bildstreifen enthaltene Zeilenbild äußere Orientierungsdaten bereitstellt. Die Verknüpfung der Bildinformation mit den zugehörigen Orientierungsdaten geschieht über die Zeilennummer. Die Orientierungsdaten enthalten folgende Informationen:

Spaltenname	Format	Einheit	Beispiel
Time	Double	sec	158030713.7000
X	Double	m	932518.8421
Y	Double	m	-3817263.9920
Z	Double	m	171569.6060
Angle_1 φ	Double	gon	91.0622
Angle_2 ω	Double	gon	82.8160
Angle_3 κ	Double	gon	-9.3671

Tabelle 4.1 Aufbau des Extori-Files

Der Zeitstempel jeder Bildzeile in Sekunden bezieht sich auf den 01. Januar 2000 (J2000-Frame). Die Orientierungswerte X, Y, Z sowie φ , ω , κ beziehen sich auf das planetozentrisch-kartesische marsfeste Koordinatensystem. Da alle weiteren Auswertungen im lokalen Tangentialsystem stattfinden, müssen die äußeren Orientierungswerte dorthin transformiert werden. Die XYZ-Koordinate des Projektionszentrums wird dabei mit der in Kapitel 3.1.3 vorgestellten Transformation überführt. Die drei Winkel müssen mit der Methode durch Komponentenvergleich (vgl. Kapitel 3.1.4) transformiert werden.

4.2.3 Näherungs- und Referenz-DGM

Um für die unbekanntenen Höhen der Maschenecken Näherungswerte interpolieren zu können, muss ein DGM eingelesen werden. Als Soll kann optional ein Referenz-DGM dienen, das mit dem berechneten Höhenmodell verglichen wird. Falls dieses zweite DGM nicht vorliegt, wird automatisch das Näherungs-DGM als Referenz angesehen. Beide DGMs liegen im VICAR-Format vor. Der Aufbau der VICAR-DGM-Datei ist identisch mit dem des HRSC-Bildstreifens, jedoch wird jedem Pixel eine Längen- und Breitenangabe zugewiesen und die entsprechende Höhe gespeichert. Die Koordinaten können sich entweder auf die Marskugel oder auf das Marsellipsoid beziehen (vgl. Kapitel 2.2).

Nötige Informationen werden wiederum aus dem Label bezogen. Hier finden sich neben den Angaben über das Bezugssystem auch die Werte für die kleine und große Halbachse sowie die Auflösung des DGMs. Aufgrund der Abbildungsverzerrungen, die durch die Speicherung der planetographischen Koordinaten in einem gleichmäßigen, ebenen Pixelraster entstehen, ist das DGM nicht gleichmaßstabil. Mit Hilfe der Transformationsvorschriften in den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 müssen die planetographischen Koordinaten zunächst in planetozentrisch-kartesische Koordinaten und anschließend in das lokale Tangentialsystem überführt werden.

4.2.4 Kalibrierungsdaten des Sensors

Die aus der Laborkalibrierung (vgl. Kapitel 2.3.1) des HRSC-Sensors bekannten Werte, werden im Programmablauf zur Korrektur angebracht. Sie sind für jede der neun Sensorzeilen bzw. jeden Kanal vorhanden und müssen für die verwendeten Kanäle eingelesen werden. Die Kalibrierungswerte sind in zwei Textdateien abgelegt, welche die Endungen *.dev und *.kal tragen. Die *.dev-Datei enthält für jedes der 5336 Pixel einer Sensorzeile einen Ablagewert in Zeilen- sowie Spaltenrichtung von der Solllage.

Die zweite Kalibrierungsdatei stellt in ihrem ersten Abschnitt für jede der neun Sensorzeilen die Kamerakonstante zur Verfügung. Im zweiten Abschnitt werden für jeden Kanal zehn Kalibrierungswerte mit ihren Standardabweichungen aufgeführt. Die nachfolgende Tabelle 4.2 zeigt die Kalibrierungswerte.

ID	Name	Einheit	Beispiel
1	$dc = foc - c'$	[mm]	0.000000
2	x0	[mm]	0.000000
3	$y0 = a'$	[mm]	-0.024261
4	Curvature	[1/mm ²]	0.000000
5	X0	[m]	0.000000
6	Y0	[m]	0.000000
7	Z0	[m]	0.000000
8	$\phi = \beta'$	[gon]	-21.045551
9	ome	[gon]	0.000000
10	kap	[gon]	0.000000

Tabelle 4.2 Beispiel der Kalibrierungswerte für eine Sensorzeile

Der Beispielwert in Zeile 8 zeigt an, dass es sich hierbei um den Vorblickkanal handelt, da der ϕ -Winkel dieser Sensorzeile um -21gon (oder -18.9°) gegenüber dem Nadirkanal geneigt ist. Der Winkel β' entspricht dem β aus der Sensorkalibrierung in Kapitel 2.3.1.

4.2.5 Weitere Eingabeparameter

Zusätzlich zu den bisher vorgestellten Eingabeparametern sind noch weitere Werte zum Programmstart zu übergeben, die in diesem Abschnitt zusammengefasst werden:

- Es muss ein Punkt in planetographischen Koordinaten vorliegen, in dem das lokale Tangentialsystem seinen Ursprung hat. Dieser Fundamentalpunkt legt die süd-westliche Ecke des Auswertungsgebietes fest und das lokale kartesische Koordinatensystem spannt sich von hier ausgehend nach Norden und Osten auf.
- Für das Ausgabe-DGM müssen die Maschenweite, Anzahl der Maschen und die darin befindliche Anzahl von Rasterelementen festgelegt werden.
- Die Position der Sonne zur Zeit der Aufnahme muss berechnet werden. Das genaue Vorgehen bei der Berechnung wird in Kapitel 4.5.3 erläutert.
- Die Ermittlung der Unbekannten durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate geschieht in einer Iterationsschleife. Um keine Endlosschleife zu produzieren, müssen Abbruchkriterien angegeben werden. Das Programm soll auch ohne Ergebnis abbrechen, wenn eine maximale Anzahl von 100 Iterationen erreicht ist. Es ist dann

zu vermuten, dass die Auswertung zu keinem einwandfreien Ergebnis konvergiert. Zusätzlich müssen auch bei Konvergenz der Auswertung zu einem korrekten Ergebnis für die Unbekannten Höhen und die Normalalbedo Abbruchwerte gesetzt werden, damit nicht endlos über die erreichbare Genauigkeitsgrenze hinweg iteriert wird.

- Bei einer Einbildauswertung muss eine direkt beobachtete Höhe angegeben werden, um den absoluten Höhenbezug zu gewähren. Da hier keine Passpunkte auf der Marsoberfläche zur Verfügung stehen, wird eine interpolierte Höhe aus dem Referenz-DGM gewählt und eine Maschenecke mit dieser festen Höhe belegt.

4.2.6 Parameterübergabe

Die vorgestellten Parameter sollen beim Programmaufruf bereitstehen und übergeben werden. Dabei kann entweder der Parameterwert selbst oder eine Pfadangabe mit Dateinamen als Referenz auf eine Eingabedatei angegeben werden. Die Parameterübergabe wird durch ein Process Definition File (*.pdf) geregelt. Das PDF-File stellt die Verknüpfung zwischen den VICAR-Funktionen zum Einlesen von Eingabeparametern und den Werten selbst dar. Im PDF-File wird jeder Parameter mit dem Schlüsselwort PARM gekennzeichnet und bekommt einen Namen zur Identifikation zugewiesen. Zusätzliche Angaben zur Kontrolle der Parameter sind optional. Es ist möglich, einen Wertebereich zu definieren oder eine bestimmte Anzahl eines Input-Arrays festzulegen. Ein Beispiel für eine Parameterzeile einer VICAR-PDF-Datei zeigt die folgende Tabelle 4.3.

Wert	Erklärung
PARM	Schlüsselwort
MISSIONS	Parametername
TYPE=STRING	Type (INT, REAL, STRING etc.)
COUNT=1	Anzahl der Parameterwerte
VALID (CLEM1, MEX)	Zulässige Parameterwerte
DEFAULT=MEX	Defaultwert

Tabelle 4.3 Beispiel: Werte einer Parameterzeile im PDF-File

Vorteilhaft ist die Angabe eines Default-Wertes für Parameter, die auch für unterschiedliche Auswertungen gleich sind, wie zum Beispiel der Marsradius oder der Missionsname. Parameter, die sich in jeder Auswertung unterscheiden, werden hingegen direkt beim Programmaufruf in eine Parameterliste aufgenommen.

Der Programmaufruf wurde bisher aus einem Kommandofenster ohne Parameterliste ausgeführt, da alle Parameter im Programmablauf aus einer Textdatei ausgelesen wurden. Um eine Liste von Parametern zu übergeben,

wird jetzt der Programmaufruf in ein Batch-File (*.csh) integriert und alle Eingabeparameter dem Programmnamen angehängt. Dabei sind die gleichen Parameternamen wie im PDF-File zu verwenden. Eingabewerte werden den Parameternamen durch ein Gleichzeichen zugewiesen.

Somit besteht die Möglichkeit, schnell und unkompliziert Parameterwerte von einer Auswertung zur nächsten zu ändern. Darüber hinaus können auch Linux-Befehle im Batch-File ausgeführt werden, so dass beispielsweise für jede Auswertung Ausgabeverzeichnisse dynamisch angelegt werden können.

4.3 Ausgabedaten

Alle Ausgabedateien einer Auswertung werden zusammen in einem Ausgabeordner abgelegt. Zur Kontrolle der Eingabewerte befinden sich sämtliche Einstellungen der Auswertung noch einmal in einer Textdatei. Darüber hinaus kann der gesamte Programmablauf in einer weiteren Meldungsdatei nachvollzogen werden. Anhand von Statusmeldungen der abgearbeiteten Funktionen und möglichen Fehlermeldungen kann somit jeder Schritt der Auswertung überprüft werden.

Für eine lückenlose Dokumentation des Ausgleichsprozesses (Kapitel 3.3.7) werden nach jeder Iteration die Kennzahlen der Ausgleichung in eine Berechnungsdatei gespeichert. Dort finden sich auch die Werte der Normalalbedo.

Die berechneten DGM-Höhen aus der Ausgleichung sind nach jeder Iteration verfügbar und liegen als Textdatei vor. Die Ausgabe in den Spalten

„Punktnummer“ „X“ „Y“ „Z“

ist kompatibel zu ArcView. Darüber hinaus werden die berechneten Modellgrauwert- und Orthobilder nach jedem Lauf ausgegeben. Somit lässt sich der Fortschritt der Auswertung auch visuell nachvollziehen. Die Bilder sind im raw-Format gespeichert und liegen jeweils in drei unterschiedlichen Arten vor:

- Das Originalbild aus der Ausgleichung
- Das Bild mit in sich gestrecktem Grauwertbereich
- Zum direkten visuellen Vergleich, das Modellgrauwertbild und das entsprechende Orthophoto gleichermaßen gestreckt

4.4 Programmaufbau

Nachdem nun die Eingabe- und Ausgabedaten vorgestellt wurden, wird in diesem Kapitel die Funktionsweise des Programms MI-SFS erläutert. Der Programmablaufplan zeigt die Vorgehensweise schematisch (Abbildung 4.2).

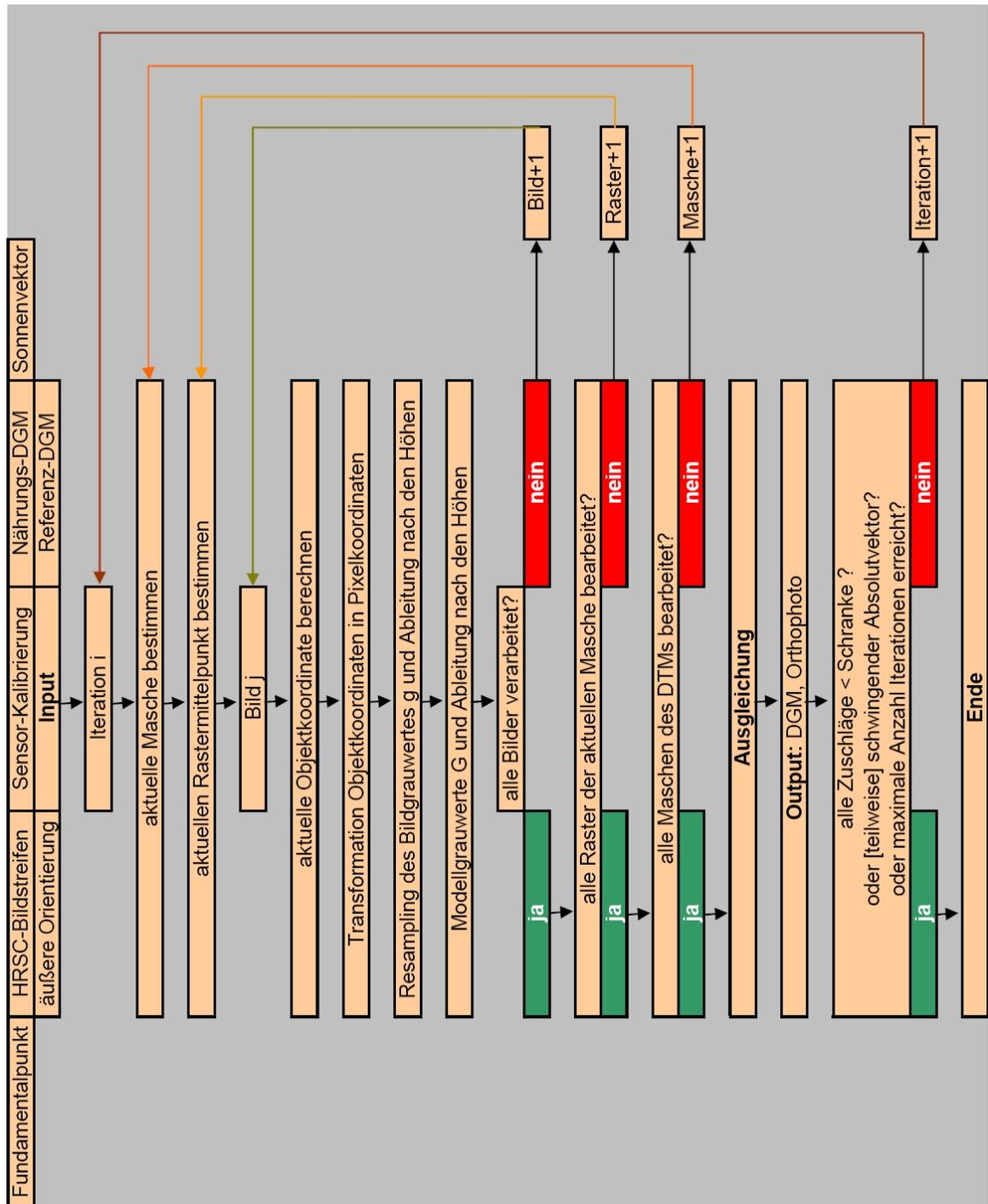


Abbildung 4.2 Ablaufplan des MI-SFS Programms zur Rekonstruktion von Oberflächen

Mit i Iterationsnummer (1, ..., n)
 j Bildnummer (1, ..., m)

Wie im Kapitel 3.3 erläutert, muss die Rekonstruktion der Oberfläche iterativ erfolgen. Innerhalb dieser Iterationsschleife müssen in allen DGM-Maschen die Objektkoordinaten der Rasterelemente bestimmt werden. Jeder Objektpunkt wird nacheinander in jedes der eingelesenen Bilder transformiert, um den entsprechenden Bildgrauwert zu ermitteln. Auf der Grundlage der Kameragleichung 3.40 aus Kapitel 3.3.4 wird der Modellgrauwert berechnet. Ebenfalls werden die Differentiale aus Gleichung 3.46 für die Verbesserungsgleichung berechnet. Nachdem die Normalgleichungsmatrix und der Absolutvektor aufgestellt sind, kann mit der Ausgleichung begonnen werden. Falls die Kriterien für die Beendigung der Iteration nicht erfüllt sind, startet sie mit den verbesserten Näherungswerten für die Unbekannten von Neuem.

4.5 Wichtige Programmerweiterungen

4.5.1 VICAR-Funktionen

VICAR stellt in eigenen Bibliotheken Funktionen zur Verfügung, die Eingabedaten einlesen, Bilder öffnen, verarbeiten und schließen, mit Labelinformationen arbeiten sowie Extori-Files auslesen können (Deen, 1998a, 1998b). Dabei muss jeder Eingabedatei, unabhängig davon, welche Informationen sie enthält, zunächst eine Unit-Number zugewiesen werden. Diese interne Dateinummer stellt die Verknüpfung der Pfadangabe der Eingabedatei mit den VICAR-Funktionen her. Bevor mit einer Datei gearbeitet werden kann wird beim Öffnen festgelegt, ob sie zum Schreiben oder Lesen genutzt werden soll. Anschließend können mit Set- oder Get-Funktionen Werte gesetzt oder gelesen werden. Andere Funktionen erlauben den Zugriff auf den Labelinhalt oder das Auslesen von Lagekoordinaten und Höhen aus einer DGM-Datei. Darüber hinaus werden alle weiteren Eingabewerte, die im Process Definition File (PDF) angegeben sind, mit Funktionen zum Einlesen von Eingabeparametern dem Programm zur Verfügung gestellt.

VICAR bringt eine eigene Fehlerbehandlung mit. Bei jeder Art von Problemen mit den Eingabe- oder Ausgabedaten können vom System generierte oder manuell eingegebene Fehlermeldungen vor dem Programmabbruch auf den Bildschirm und in die Meldungsdatei ausgegeben werden.

4.5.2 Funktion MEX-DGMEinlesen()

Bei der Auswertung mit Clementine-Bildern wird das Näherungs- und Referenz-DGM bereits aus einer Textdatei eingelesen und liegt in der gewählten Größe des Auswertungsgebietes vor. Die Koordinaten befinden sich außerdem schon im lokalen System, so dass keine Transformation mehr notwendig ist. Für HRSC-Bilder muss zunächst ein Ausschnitt aus einem externen DGM genommen werden. Außerdem muss für jeden Maschenpunkt des Näherungs-DGMs eine

Höhen interpoliert werden. Aufgrund dieser Unterschiede ist es nötig, für die HRSC-Auswertung eine neue Funktion zu schreiben.

Da die externen DGMs im VICAR-Format vorliegen, werden sie zunächst mit den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Funktionen zum Auslesen geöffnet und Labelparameter, wie zum Beispiel die große und kleine Halbachse des Bezugsellipsoids, bereitgestellt.

Anschließend wird das Pixel im DGM gesucht, welches der Fundamentalkoordinate am Nächsten liegt. Mit diesem DGM-Pixel als Mittelpunkt wird ein grobes Gebiet aus dem externen DGM ausgeschnitten. Die Größe dieses Grobgebietes wird anhand von Maschenanzahl und Maschenweite des zu erzeugenden DGMs, sowie der Auflösung des externen DGMs, dynamisch festgelegt. Somit ist sichergestellt, dass das Grobgebiet das tatsächliche Auswertungsgebiet auch vollständig enthält. Anschließend wird das gesamte Grobgebiet in das lokale Tangentialsystem überführt. Es wird programmseitig berücksichtigt, ob das externe DGM auf die Marskugel oder auf das Ellipsoid bezogen ist und ob die planetographischen Koordinaten westliche oder östliche Längen darstellen.

Das nun im lokalen System vorliegende Grobgebiet ist nicht gleichmaßstäbig (vgl. Kapitel 4.2.3). Deshalb werden die Höhen für die Maschenpunkte des Näherungs-DGMs aus den drei nächstgelegenen Höhen des externen DGMs interpoliert. Das interpolierte DGM wird in eine Textdatei ausgegeben und zur weiteren internen Verarbeitung in einer Matrix gespeichert. Für ein vorhandenes Referenz-DGM wird entsprechend verfahren.

4.5.3 Funktion MEX_SetSunPos()

Die Ermittlung der Beleuchtungsrichtung ist für die MI-SFS Methode von großer Bedeutung. Bei der Clementine-Auswertung steht der Sonnenvektor für jedes Bild bereits zur Verfügung. Bei HRSC-Zeilenbildern muss die Sonnenposition für jeden Bildstreifen berechnet werden. Dabei wird, aufgrund des sehr kleinen Auswertungsgebiets und der hohen Aufnahme- und Überfluggeschwindigkeit der Mars Express Sonde, nur ein Sonnenvektor pro Bildstreifen bestimmt. Die Positionsänderung der Sonne während der Aufnahme des gesamten Auswertungsgebiets ist vernachlässigbar gering.

Die Funktion MEX_SetSunPos() bedient sich eines SPICE-Kernels (SPICE steht für „Spacecraft, Planet, Instrument, Pointing (C-Matrix), Events“ der Navigation Ancillary Information Facility (NAIF) der NASA), welcher die Positionen der Sonne bezogen auf das Zentrum jedes Planeten unseres Sonnensystems bereitstellt (siehe Taber, Bachman, 2005). Die Werte können für jeden beliebigen Zeitpunkt in den letzten 10 Jahren und auch für die Zukunft in den nächsten 10 Jahren berechnet werden. Die Aufnahmezeit wird für eine

Bildzeile, die einen Teil des Auswertungsgebiets abbildet, aus dem Extori-File bezogen. Der Zeitstempel liegt im J2000-Frame vor und kann ohne Umrechnung übernommen werden. Zusätzlich ist es nötig, den Planeten zu nennen, auf dessen Zentrum der Sonnenstand bezogen sein soll. Der Mars hat hierbei die Target-ID 499. Als Ergebnis wird ein dreidimensionaler Vektor zurückgegeben, welcher vom planetozentrisch-kartesischen Koordinatensystem in das lokale Tangentialsystem transformiert (vgl. Kapitel 3.1.3) und als Einheitsvektor gespeichert wird.

4.5.4 Funktion SubImage()

Ein HRSC-Bildstreifen kann mehrere Zehntausend Bildzeilen enthalten. Das Einlesen der gesamten Bildstreifen und das Speichern der Grauwerte zur Weiterverarbeitung würde sehr viel Rechenzeit in Anspruch nehmen oder gar die Kapazitäten des Rechners sprengen. Es ist also nicht sinnvoll, für ein kleines Auswertungsgebiet derart viel nicht verwendete Information zu verarbeiten. Aus diesem Grunde wird mit der Funktion SubImage() ein Bildausschnitt aus jedem der verwendeten Bildstreifen gewonnen.

Dafür werden die vier Eckkoordinaten des Auswertungsgebiets in Pixelkoordinaten transformiert. Da das Auswertungsgebiet genordet ist, der Bildstreifen aber mit einer beliebigen Flugrichtung aufgenommen wurde, ist es nötig, die minimale und maximale Spalte und Zeile des genutzten Bildinhaltes zu ermitteln. Ist der Bereich des Auswertungsgebiets in den Bildern festgestellt, wird in jede Richtung ein Sicherheitswert von 400 Pixeln aufgeschlagen. Somit ist gewährleistet, dass später bei der Transformation der Objektkoordinaten mit Näherungshöhen auch ein entsprechendes Pixel zur Verfügung steht, wenn die Näherungswerte ungenau sind.

4.5.5 Funktion kh_ColliMc2lc()

Diese Funktion gibt für kartesische Objektkoordinaten im lokalen System die Zeile und Spalte im Bildstreifen zurück. Da die Geometrie des Zeilensensors berücksichtigt werden muss, ist es notwendig, eine neue Funktion zu implementieren. Wie in Kapitel 3.1.1 bereits beschrieben, dient zur Transformation vom Objektraum in den Bildraum die erweiterte Kollinearitätsgleichung. Die Pixelkoordinaten werden nach der vorgestellten Methode iterativ bestimmt.

Zunächst müssen alle Werte der inneren Orientierung bereitgestellt und die innere Drehmatrix M (vgl. Kapitel 3.1.1.1, Gleichung 3.1) aufgestellt werden. Anschließend wird für die erste Zeile im Bildstreifen als Näherungszeile die äußere Orientierung eingelesen und die äußere Drehmatrix D aufgestellt. Daraufhin können die Objektkoordinaten mit der Kollinearitätsgleichung (3.3,

3.4) in das Zeilenbildkoordinatensystem transformiert werden. Mit der in Kapitel 3.1.1.4 dargelegten Formel und der aus Gleichung 3.4 erhaltenen Bildkoordinate y' kann sodann die Pixelspalte ermittelt werden. Im nächsten Schritt wird gemäß Kapitel 3.1.1.3 zurück in Bildkoordinaten gerechnet und als Ergebnis die aktuelle Bildzeile mit angebrachten Kalibrierungswerten erhalten. Die Differenz zwischen der x' -Koordinate aus der Kollinearitätsgleichung und der mit den Kalibrierungswerten berechneten x' -Koordinate wird als Verbesserung zur Näherungszeile addiert. Falls diese Verbesserung nicht Null ist, wird die Iteration mit der neuen Näherungszeile fortgesetzt.

Die Funktion `kh_ColliMc2lc()` transformiert in der Iterationsschleife des Ausgleichungsprozesses die Koordinaten der Rasterelemente des radiometrischen Oberflächenmodells (vgl. Kapitel 3.3.6) in die Bilder. Darüber hinaus wird sie bei der Berechnung des Sonnenvektors sowie bei der Ermittlung des HRSC-Bildausschnittes (Funktion `SubImage()`) verwendet.

4.5.6 Funktion `MEX_AbleitungBild()`

Die Funktion `MEX_AbleitungBild()` stellt die in Kapitel 3.3.7, Gleichung 3.46 behandelten Differenziale für die linearisierte Verbesserungsgleichung bereit. Da sich die mathematische Beschreibung der Sensorgeometrie vom Flächensensor zum Zeilensensor grundlegend geändert hat, muss eine neue Funktion für die HRSC-Auswertung bereitgestellt werden. Zunächst wird die partielle Ableitung nach den Höhen aus Kapitel 3.1.1.1 sowie die Ableitungen nach den Bildkoordinaten x' und y' aus Kapitel 3.1.1.4 berechnet. Es folgt die Interpolation der Gradientenwerte in Zeilen- und Spaltenrichtung mit der Resampling-Gleichung aus Kapitel 3.2.

Anschließend muss der erste Term aus Gleichung 3.46 jeweils mit den vier Differenzialen

$$\frac{\partial Z}{\partial Z_{k,l}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_{k+1,l}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_{k,l+1}}, \frac{\partial Z}{\partial Z_{k+1,l+1}}$$

aus der bilinearen Interpolation der Höhen (Gleichung 3.41) multipliziert werden und kann an die Ausgleichungsfunktionen übergeben werden.

5 Auswertung

Das um die Zeilengeometrie erweiterte MI-SFS Programm soll anhand von HRSC-Daten der Mars Express Mission getestet werden. Die Ergebnisse der Einbild- und Mehrbildauswertungen werden im Folgenden vorgestellt und bewertet. Zuvor wird auf die Auswahl des Gebietes und die gesetzten Parameter der Auswertung eingegangen.

Für die MI-SFS Methode muss zunächst ein Ausschnitt eines HRSC-Bildstreifens gefunden werden, der eine gleichmäßig reflektierende Oberfläche enthält. Für eine aussagekräftige Interpretation der Ergebnisse sollte das Auswertungsgebiet einen ausreichend großen Höhenunterschied aufweisen. Des Weiteren sollte das Gebiet leicht wiedererkennbare geographische Strukturen, zum Beispiel Krater, zur besseren visuellen Kontrolle aufweisen.

Die durch diese Strukturen verursachten Geländeneigungen müssen ausreichend beleuchtet sein. Es darf kein Schattenwurf auftreten. Deshalb muss für ein in Frage kommendes Auswertungsgebiet der Sonnenvektor bestimmt und mit Hilfe eines Höhenmodells das Gebiet auf mögliche Abschattungen überprüft werden.

Der HRSC-Orbit 1235 zeigt im nördlichen Teil eine Ebene, die mit leichten Senken und Rücken durchzogen ist und einige Krater enthält. Innerhalb des Gebietes befinden sich keine größeren Albedovariationen (vgl. Kapitel 3.3.2 „Die Albedo“). Zur Zeit der Aufnahme stand die Sonne im Nordwesten (ca. 318°) und mit einem Vertikalwinkel von 68° ausreichend hoch über dem Horizont (Abbildung 5.1).

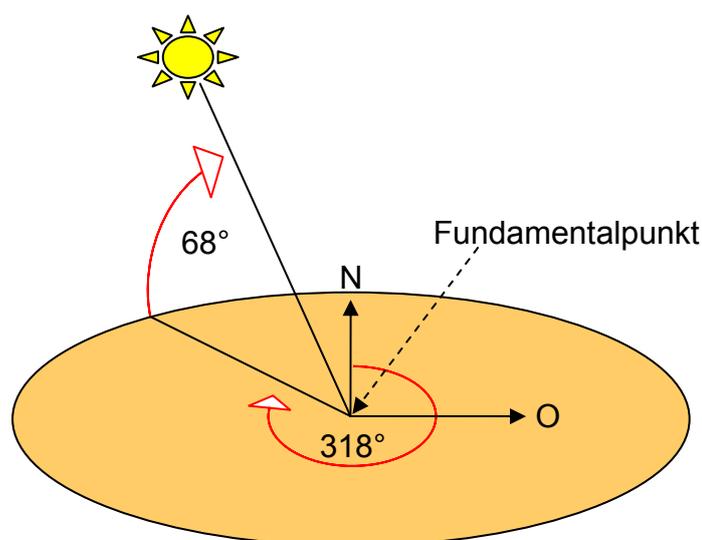


Abbildung 5.1 Sonnenstand zur Zeit der Aufnahme

Aufgrund dieser günstigen Voraussetzungen wird im Orbit 1235 ein Auswertungsgebiet gewählt (siehe Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9). Der Fundamentalpunkt des lokalen Koordinatensystems wird auf die planetographischen Koordinaten

Breite: 1.940° Nord
Länge: 282.842° Ost

gesetzt. Bei ausreichend großer Ausdehnung des Gebietes befindet sich somit mindestens ein Krater in diesem Bereich. Die Koordinaten des Fundamentalpunktes legen die südwestliche Ecke des zu rekonstruierenden Gebietes fest, so dass sich das Gebiet nach Norden und Osten erstreckt. In Abbildung 5.2 ist ein Bildmosaik der Marsoberfläche abgebildet, welches den Canyon Valles Marineris im zentralen Bereich zeigt. Das Auswertungsgebiet liegt nördlich davon und wird in seiner Lage mit einem roten Quadrat markiert.

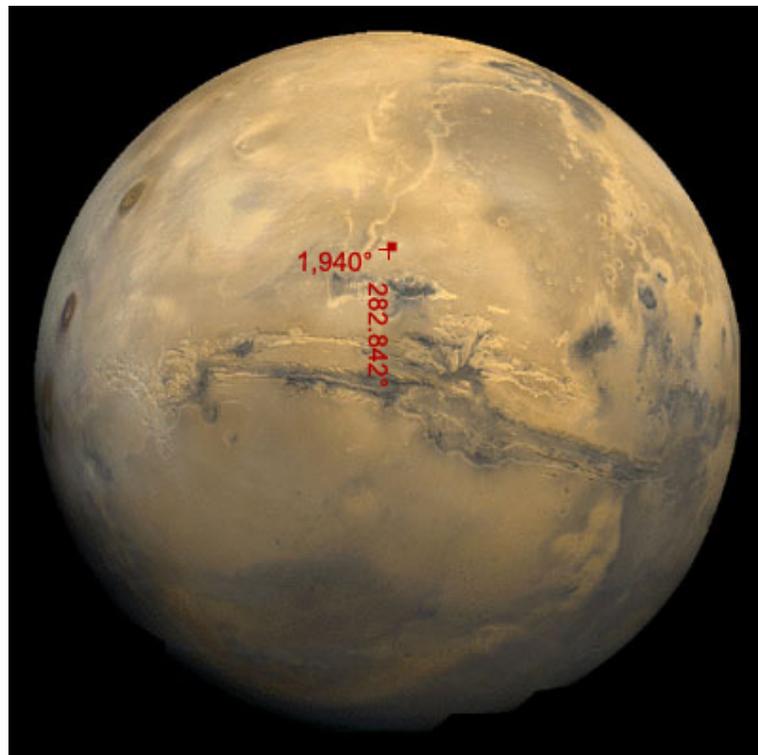


Abbildung 5.2 Auswertungsgebiet auf der Marsoberfläche mit Fundamentalpunktkoordinaten

Die Wahl der Gebietsgröße hängt nicht nur von der Bodenauflösung an der Position im Bildstreifen ab, sondern es muss auch berücksichtigt werden, dass der Algorithmus für die Auswertung viel Rechenzeit in Anspruch nimmt. Zum Beispiel benötigt eine Einbildauswertung mit den in dieser Arbeit verwendeten Daten und gesetzten Parametern auf einem handelsüblichen Computer ca. 3-4 Stunden. Eine Mehrbildauswertung mit drei Eingabebildern ca. 7-8 Stunden. Diese Werte gelten für eine durchschnittliche Iterationszahl von acht Iterationen.

Da es sich bei den Prozessierungsläufen um Tests handelt, welche die Möglichkeiten von MI-SFS mit HRSC-Daten aufzeigen sollen, ist es sinnvoll, ein kleineres Gebiet zu wählen. Der Zeitaufwand für die Berechnungen wird somit gering gehalten. Auf der anderen Seite soll das Gebiet groß genug sein, um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können.

Die Bodenauflösung der HRSC-Stereokanäle beträgt im gewählten Gebiet ca. 50m. Die Rasterweite soll so gewählt werden, dass sie annähernd der in den Objektraum übertragenen Pixelgröße entspricht (vgl. Kapitel 3.3). Die Rasterweite wird demzufolge auf 50m gesetzt. Eine Bewegung im Bildraum von einem Pixel, bei einer Pixelgröße von 7 μ m, verursacht im Objektraum im Mittel eine Höhenänderung von 45m.

Die Maschenweite des zu erzeugenden DGMs entspricht hier einem Vielfachen der Rasterweite. Mit einer Maschenweite von 150m ist ein guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit gefunden. Denn bei 2x2 Rasterelementen pro Masche steigt bei gleicher Gebietsgröße die Anzahl der unbekannt Maschenhöhen um mehr als das Zweifache. Zudem wird das Verhältnis zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten ungünstiger. Bei mehr als 3x3 Rasterelementen wird das rekonstruierte DGM zu grobmaschig und die Ausgabebilder haben eine zu geringe Auflösung.

Grafik Abbildung 5.3 zeigt den Zusammenhang zwischen den umliegenden vier Maschenhöhen Z_1 bis Z_4 und den Rasterelementen innerhalb der Masche.

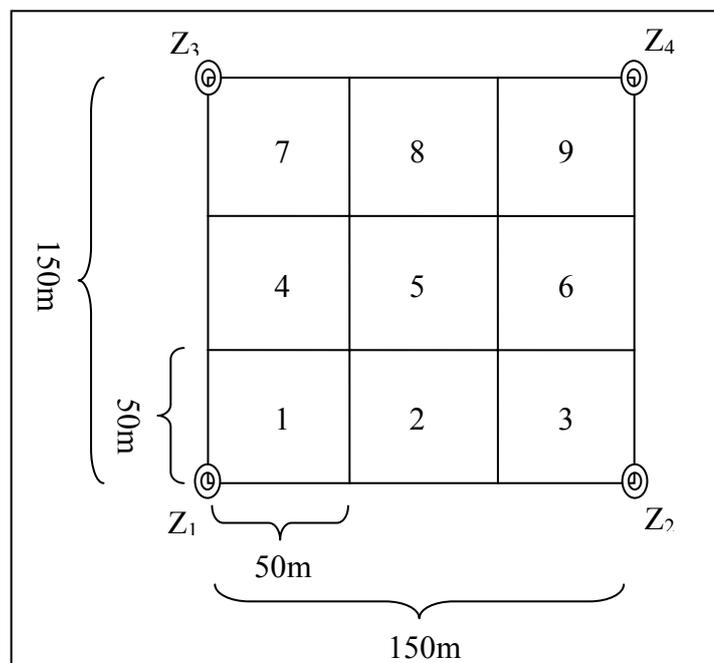


Abbildung 5.3 Eine DGM-Masche mit 3x3 Rasterelementen á 50m

Das Auswertungsgebiet wird mit einer Größe von 50x50 Maschen (7500x7500m) angesetzt. Dies entspricht einer Anzahl von 2601 unbekanntenen Maschenhöhen.

Für das gewählte Gebiet liegt ein DGM aus MOLA-Daten mit einer Auflösung von ca. 450m vor (siehe Abbildung 5.6). Das DGM kann aufgrund seiner Grobmaschigkeit keine Kleinstrukturen auflösen. Trotzdem wird die Oberfläche ausreichend gut dargestellt und das DGM wird als Näherung für den Auswertalgorithmus verwendet.

Das für das Auswertungsgebiet mittels MI-SFS erzeugte DGM soll, um Genauigkeitsaussagen treffen zu können, mit einer Referenz verglichen werden. Hierzu liegt im Orbit 1235 ein 75-Meter-DGM (siehe Abbildung 5.5) vor, welches aus dem Matching mit radiometrisch kalibrierten, gefilterten HRSC-Bildern entstanden ist (Gwinner, 2005). Es ist zu beachten, dass dieses hier verwendete Referenz-DGM nicht fehlerfrei sein muss. Allerdings kann bei der Erzeugung von DGMs auf dem Mars nicht, wie auf der Erde, auf unabhängige Überprüfungen (zum Beispiel GPS-Messungen) zurückgegriffen werden.

Im Programmablauf wird das erzeugte DGM mit dieser Referenz verglichen und die Standardabweichung sowie die mittlere Höhenabweichung ermittelt.

Alle auf den folgenden Seiten abgebildeten 3D-Ansichten der Marsoberfläche sind in ihrer Farbgebung an das Referenz-DGM angepasst und befinden sich im gleichen Koordinatensystem. Somit ist ein direkter visueller Vergleich möglich.

Der Höhenunterschied im Referenz-DGM beträgt ca. 1000m. Die Farbskala zeigt die verwendete Aufteilung von Hellbraun bei ca. 2200m und Dunkelbraun bei 3200m. Die Höhen beziehen sich auf die Marskugel (siehe Kapitel 2.2).

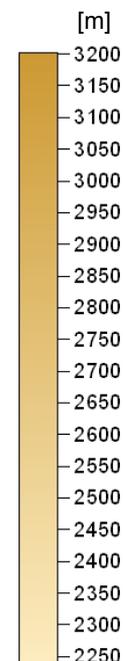


Abbildung 5.4 DGM-Farbskala

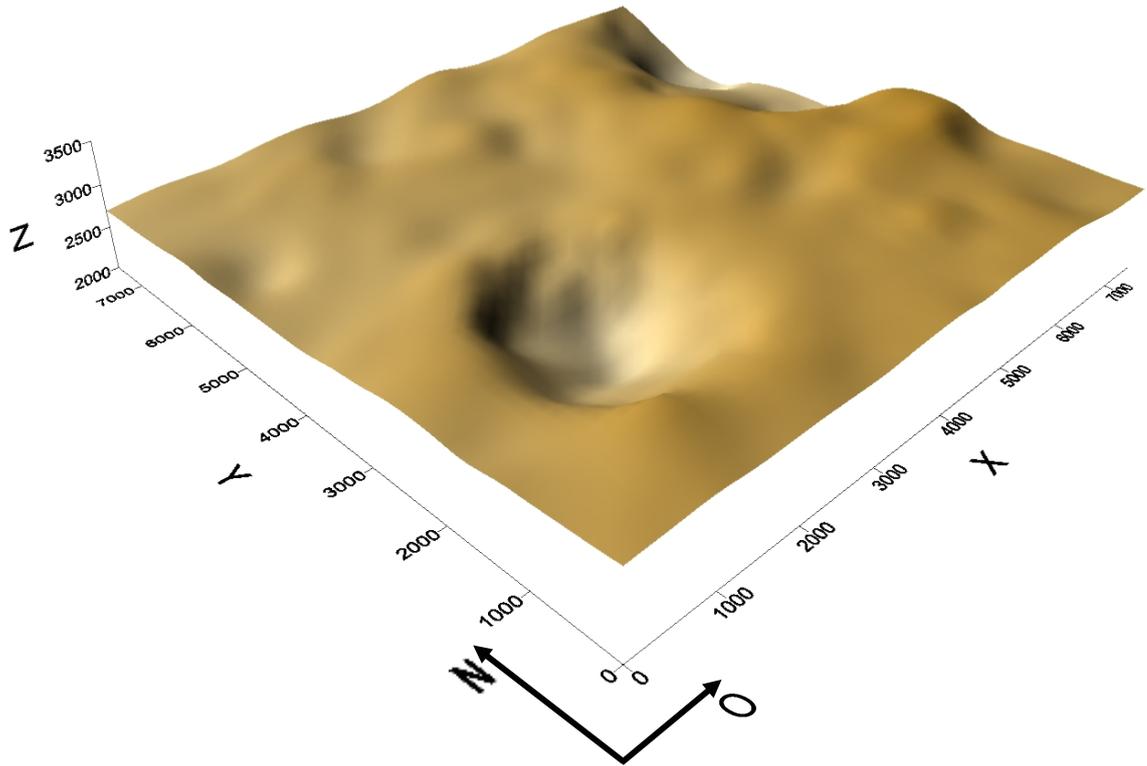


Abbildung 5.5 Referenz-DGM aus dem Matching, Auflösung ca. 75m

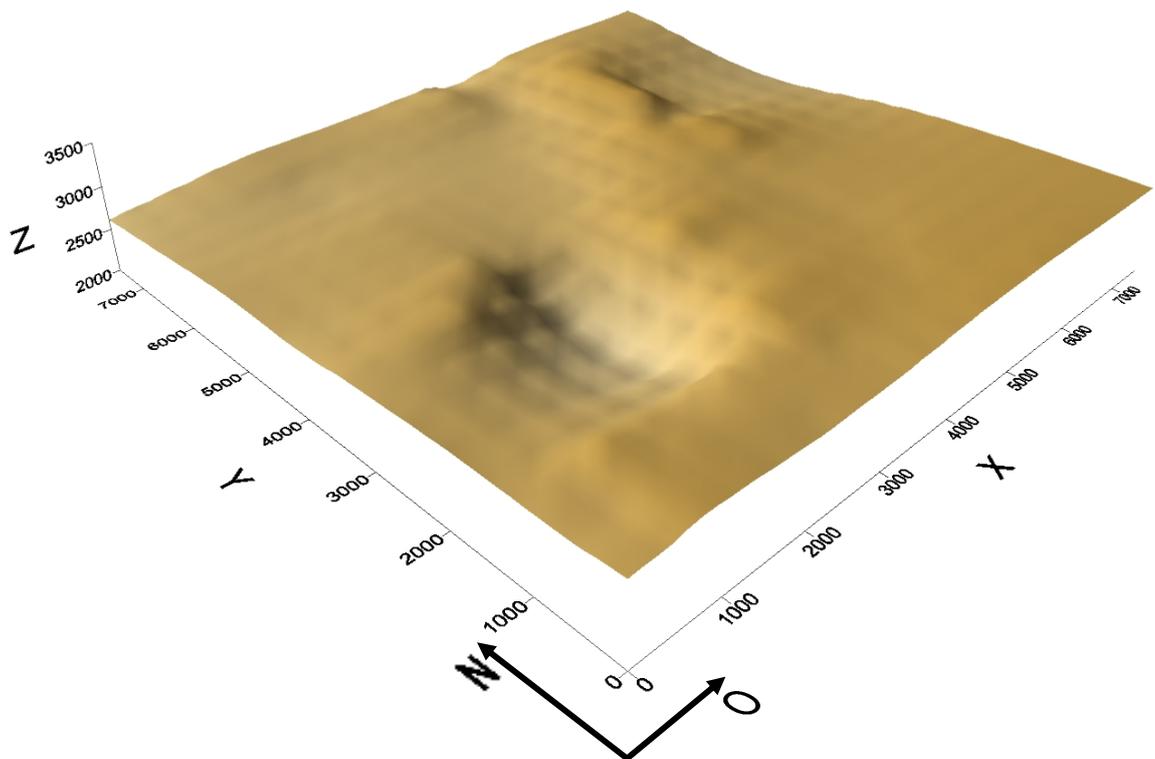


Abbildung 5.6 Näherungs-DGM aus MOLA-Daten, Auflösung ca, 450m

Als Eingabebilder werden für die Einbild- und Mehrbildauswertung die radiometrisch kalibrierten HRSC-Stereokanäle s22, s12 sowie der Nadirkanal des Orbits 1235 gewählt. Die sechs weiteren Kanäle der HRSC könnten theoretisch ebenfalls genutzt werden. Allerdings wird darauf verzichtet, da sie eine geringere Auflösung von 100m bei den zwei Photometriekanälen und 200m bei den Multispektralkanälen haben.

Tabelle 5.1 zeigt beispielhaft eine äußere Orientierung der gewählten Kanäle im lokalen Tangentialsystem. Das Gebiet wurde in Süd-Nord-Richtung befliegen, und der Orbiter war zur Zeit der Aufnahme um 180° um die vertikale Achse gedreht (flightdir = -1, vgl. Kapitel 3.1.1.3), so dass der Vorblickkanal s12 nun der Rückblick ist und Kanal s22 entsprechend der Vorblick. Die mittlere Flughöhe beträgt 546km.

	s22 (Vorblick)	s12 (Rückblick)	Nadir
X0 [m]	58390.7	61629.2	60464.2
Y0 [m]	-251096.6	195523.8	-4442.9
Z0 [m]	594702.3	499049.4	546112.1
φ [gon]	2.5	2.9	2.7
ω [gon]	4.4	-2.8	0.5
κ [gon]	-100.7	-100.6	-100.7

Tabelle 5.1 Beispiel: Äußere Orientierungsdaten im Auswertungsgebiet

Die folgenden drei Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9 zeigen einen Ausschnitt aus den drei Original-Bildstreifen mit markiertem Auswertungsgebiet. Die Grauwerte sind in den Bildern als rationale Zahlen angegeben (vgl. Kapitel 4.2.1). Der Grauwertebereich der drei markierten Bereiche liegt zwischen

Grauwert min. = 0.0419395
 Grauwert max. = 0.0708634

Die Kamerakonstanten der drei Sensoren zeigt die nächste Tabelle 5.2.

Sensor	Kamerakonstante c
Stereokanal „s22“ (Vorblick)	c = 184.9mm
Stereokanal „s12“ (Rückblick)	c = 184.8mm
Nadirkanal	c = 175.0mm

Tabelle 5.2 Kamerakonstanten der drei verwendeten Sensoren

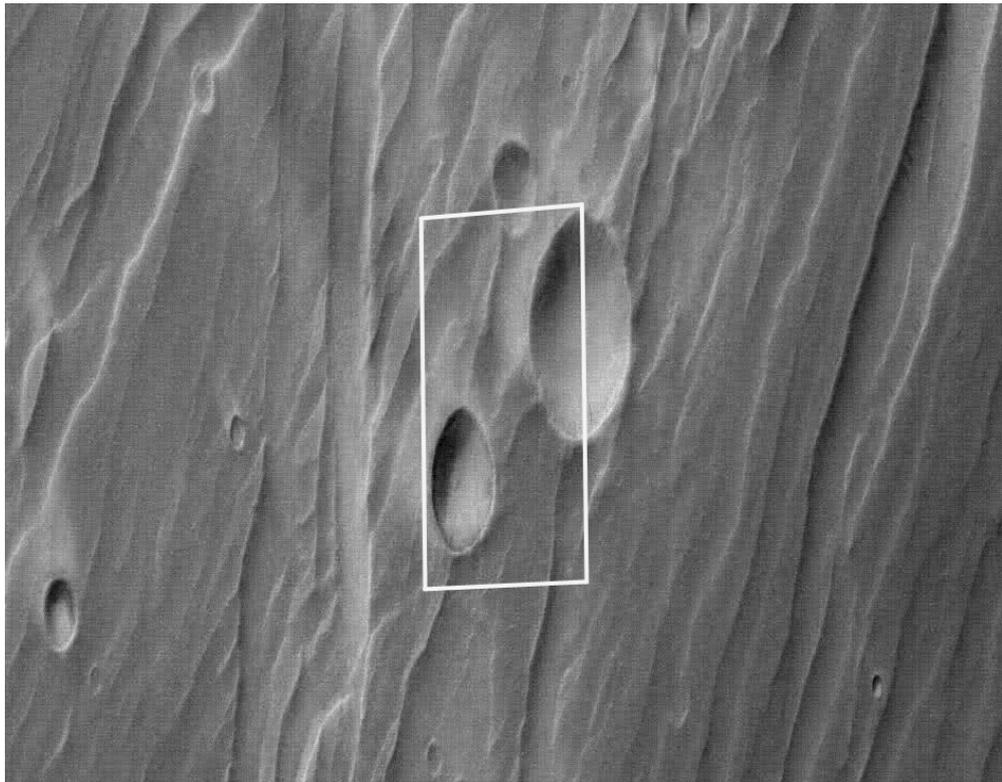


Abbildung 5.7 Stereokanal s22, Ausschnitt aus dem Bildstreifen mit markiertem Auswertungsgebiet

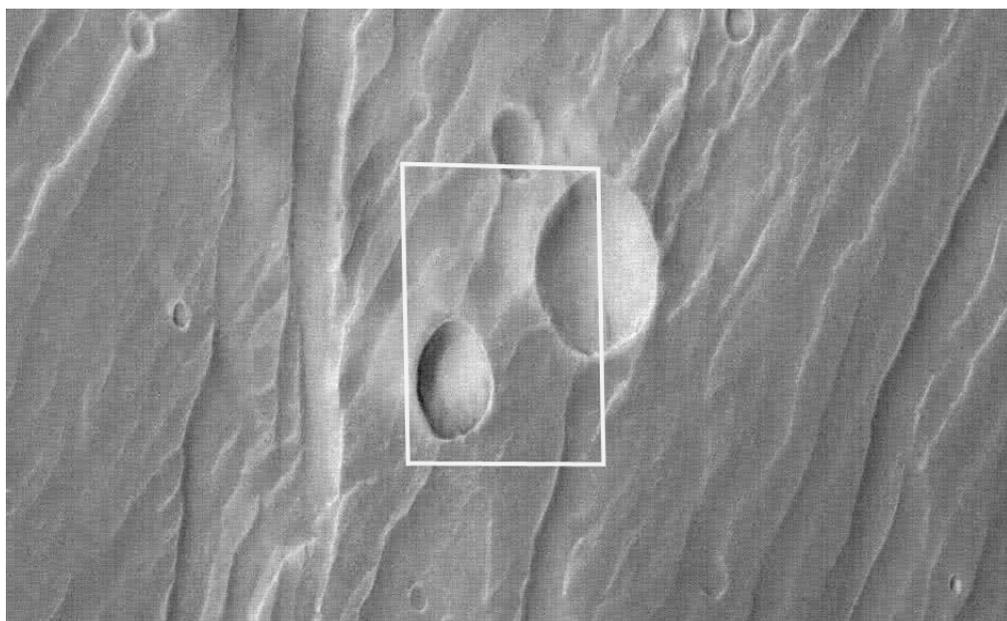


Abbildung 5.8 Stereokanal s12, Ausschnitt aus dem Bildstreifen mit markiertem Auswertungsgebiet

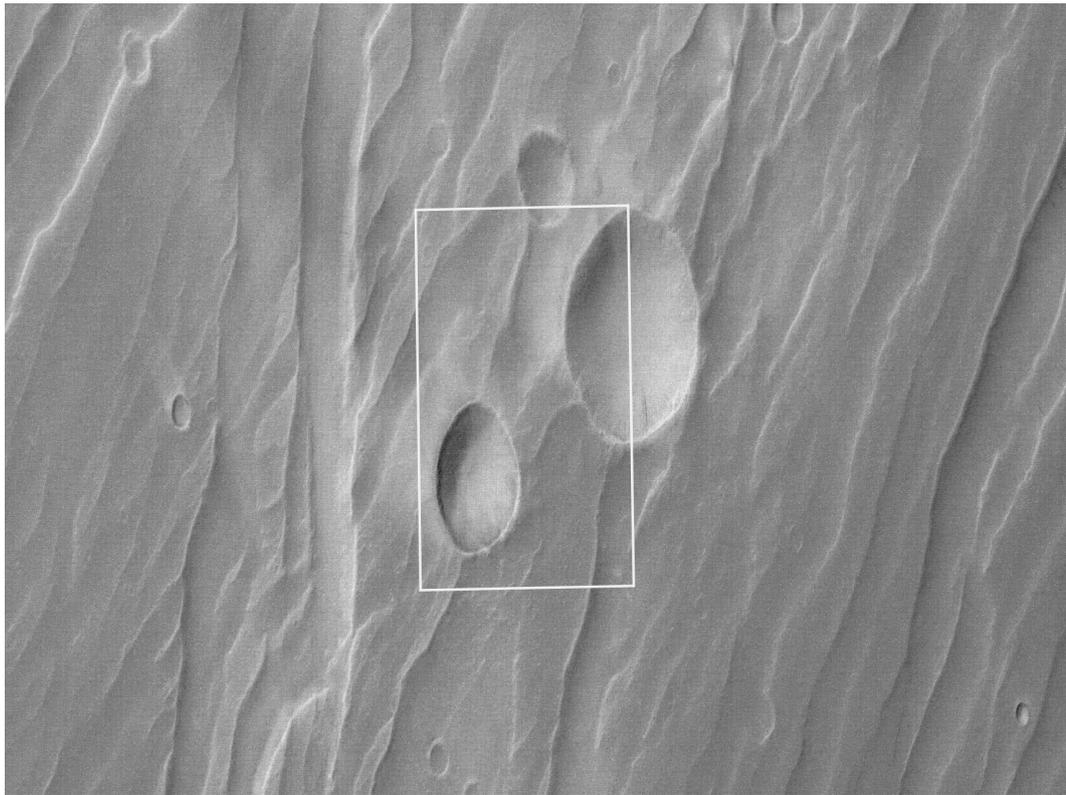


Abbildung 5.9 Nadirkanal, Ausschnitt aus dem Bildstreifen mit markiertem Auswertungsgebiet

Da nun sämtliche Eingabedaten zur Verfügung stehen und ein Auswertungsgebiet in Lage und Größe festgelegt wurde, kann mit der Ermittlung der Parameter für die Prozessierung begonnen werden.

Um auch bei Einbildauswertungen absolute Höhen erhalten zu können, muss eine direkt beobachtete Höhe in die Ausgleichung eingeführt werden. Der Maschenpunkt X_{51} , Y_{14} (vgl. Kapitel 3.3.5) des zu rekonstruierenden DGMs wird mit der interpolierten Höhe aus dem Referenz-DGM von $Z(X_{51}, Y_{14}) = 2934.7m$ festgesetzt. Für alle weiteren Stützpunkte des Ausgabe-DGMs werden für den Algorithmus Näherungswerte aus dem MOLA-DGM interpoliert.

Auch für die unbekanntene Normalalbedo A_N müssen für jedes Bild Näherungswerte eingeführt werden. Ein guter Näherungswert ergibt sich aus dem mittleren Grauwert des Bildausschnittes, welcher das Auswertungsgebiet abbildet. Tabelle 5.3 zeigt die eingeführten Näherungswerte der Normalalbedo für die drei Bilder.

Bild	Näherung Normalalbedo
Stereokanal „s22“	0,06007
Stereokanal „s12“	0,06376
Nadir	0,06242

Tabelle 5.3 Näherungswerte für die Normalalbedo pro Bild

Zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren $\lambda(\alpha)$ des Lunar-Lambert-Reflexionsmodells (vgl. Kapitel 3.3.3.3) werden einige Testläufe vor der eigentlichen Auswertung gestartet. Ein $\lambda(\alpha)$ soll empirisch für jedes Bild ermittelt werden. Pro Bild werden 11 identische Auswertungen durchgeführt, wobei lediglich der Wert für $\lambda(\alpha)$, von 0.0 ausgehend, in Schritten von 0.1 inkrementiert wird.

Anhand der Standardabweichung s der berechneten DGM-Höhen (Formel 5.1) sowie der mittleren Höhenabweichung Z_0 gegenüber dem Referenz-DGM wird der bestmögliche Wert für $\lambda(\alpha)$ ermittelt.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Z_{\text{Soll}} - Z_{\text{Ist}})^2}{n - 1}} \quad 5.1$$

Die Tabelle 5.4 zeigt die Ergebnisse der empirischen Ermittlung für $\lambda(\alpha)$. Es werden die Näherungswerte für die Normalalbedo A_N den Ist-Werten gegenübergestellt. Die letzten drei Spalten enthalten die empirische Standardabweichung s und den mittleren Höhenoffset Z_0 gegenüber dem Referenz-DGM sowie die Anzahl der benötigten Iterationen.

Aufgrund der minimalen Standardabweichung und der geringsten Höhendifferenz wird beim Bildstreifen s22 ein $\lambda(\alpha)$ von 0.1 und beim zweiten Stereokanal s12 ein $\lambda(\alpha)$ von 0.3 gewählt (siehe gelbe Markierung). Die berechneten Werte der Normalalbedo stimmen für die Stereokanäle bei den gewählten Lambdawerten gut mit der Näherung überein.

Der Nadirkanal nimmt hier eine Sonderstellung ein, da seine beinahe vertikale Blickrichtung eine genaue Bestimmung der Unbekannten nicht zulässt. Eine Höhenänderung im Objektraum resultiert in nur einem sehr kleinen Sprung im Bild. Aufgrund dessen kann der Nadirkanal allein nicht zu einem befriedigenden Ergebnis konvergieren. Dies zeigt sich auch an der uneinheitlichen Anzahl der Iterationen gegenüber den beiden Stereokanälen sowie der meist hohen Standardabweichung. In drei Fällen konnte gar kein Ergebnis erzielt werden und die Auswertung wurde nach der 100. Iteration abgebrochen.

Bild	$\lambda(\alpha)$	Näherung A_N [W sr ⁻¹ m ⁻²]	Ist- A_N [W sr ⁻¹ m ⁻²]	s [m]	Z ₀ [m]	Anzahl Iterationen
s22	0,00000	5,97E-02	6,05E-02	147,7	27,0	8
s22	0,10000	5,97E-02	6,01E-02	144,2	25,3	10
s22	0,20000	5,97E-02	5,95E-02	150,5	37,6	10
s22	0,30000	5,97E-02	5,88E-02	156,6	47,6	12
s22	0,40000	5,97E-02	5,87E-02	216,1	77,8	14
s22	0,50000	5,97E-02	5,77E-02	180,9	73,8	5
s22	0,60000	5,97E-02	5,71E-02	174,8	74,4	5
s22	0,70000	5,97E-02	5,64E-02	161,3	66,1	4
s22	0,80000	5,97E-02	5,58E-02	155,2	62,2	4
s22	0,90000	5,97E-02	5,52E-02	150,2	58,8	4
s22	1,00000	5,97E-02	5,46E-02	145,6	55,0	3
s12	0,00000	6,42E-02	6,47E-02	170,2	63,9	6
s12	0,10000	6,42E-02	6,45E-02	191,7	-22,5	16
s12	0,20000	6,42E-02	6,41E-02	172,6	76,9	17
s12	0,30000	6,42E-02	6,38E-02	164,0	59,3	10
s12	0,40000	6,42E-02	6,32E-02	167,1	41,2	19
s12	0,50000	6,42E-02	6,27E-02	169,4	32,0	8
s12	0,60000	6,42E-02	6,22E-02	175,3	33,4	9
s12	0,70000	6,42E-02	6,17E-02	184,8	43,1	7
s12	0,80000	6,42E-02	6,13E-02	195,3	47,3	8
s12	0,90000	6,42E-02	6,04E-02	208,2	27,6	7
s12	1,00000	6,42E-02	5,97E-02	233,6	13,3	12
Nadir	0,00000	6,18E-02	6,23E-02	322,1	261,5	39
Nadir	0,10000	6,18E-02	6,21E-02	277,5	192,1	37
Nadir	0,20000	6,18E-02	6,24E-02	159,8	-4,2	12
Nadir	0,30000	6,18E-02	6,15E-02	211,8	130,3	23
Nadir	0,40000	6,18E-02	5,98E-02	1008,7	860,5	100
Nadir	0,50000	6,18E-02	6,05E-02	330,6	225,5	47
Nadir	0,60000	6,18E-02	6,04E-02	267,7	38,4	48
Nadir	0,70000	6,18E-02	5,81E-02	632,2	366,5	100
Nadir	0,80000	6,18E-02	5,62E-02	1690,2	1066,9	58
Nadir	0,90000	6,18E-02	5,48E-02	1979,7	1269,1	100
Nadir	1,00000	6,18E-02	5,81E-02	382,9	258,5	6

Tabelle 5.4 Empirische Ermittlung der Werte für $\lambda(\alpha)$

Um das Nadirbild später bei der Mehrbildauswertung verwenden zu können, muss auch hier ein Lambdawert bestimmt werden. Da sich die geringste Standardabweichung bei einem $\lambda(\alpha)$ von 0.2 ergibt und dies in guter Korrespondenz zu den ermittelten Werten der Stereokanäle steht, wird im Folgenden für den Nadirkanal dieses Lambda angesetzt.

Die ermittelten Werte für $\Lambda(\alpha)$ zeigen eine Reflexion der Oberfläche, die stark in Richtung des Lambert-Gesetzes tendiert. Da alle drei Bildausschnitte in den Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9 helle Oberflächen zeigen, stimmen die hier ermittelten Werte gut mit der Aussage aus Kapitel 3.3.3.1 überein, dass das Lambert-Gesetz für helle Oberflächen sehr gut geeignet ist.

5.1 Einbildauswertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Einbildauswertung vorgestellt. Um die Unabhängigkeit des MI-SFS Auswertalgorithmus von den Näherungshöhen zu demonstrieren, werden verschiedene Näherungs-DGMs eingeführt. Hierfür wird für das Näherungs-DGM ein Maßstabsfaktor angegeben. Dieser ermöglicht eine Abflachung der Näherungstopographie bis hin zu einer Ebene, die der mittleren Geländehöhe entspricht. Es wird neben der Originaltopographie aus MOLA und einer Ebene mit dem Maßstab 0.0, eine um den Faktor 0.5 abgeflachte Geländeoberfläche als Näherung getestet. Tabelle 5.5 zeigt die Ergebnisse für den Vorblick- und Tabelle 5.6 für den Rückblick-Stereokanal.

Bild	m _{DGM}	$\Lambda(\alpha)$	A_N [W sr ⁻¹ m ⁻²]	s [m]	Z ₀ [m]	Anzahl Iterationen
s22	1,00	0,1	6,00E-02	143,7	27,0	8
s22	0,50		6,01E-02	181,2	50,1	6
s22	0,00		6,02E-02	183,1	45,6	5

Tabelle 5.5 Ergebnisse der Einbildauswertung mit dem Vorblick-Kanal s22

Bild	m _{DGM}	$\Lambda(\alpha)$	A_N [W sr ⁻¹ m ⁻²]	s [m]	Z ₀ [m]	Anzahl Iterationen
s12	1,00	0,3	6,38E-02	165,7	60,3	13
s12	0,50		6,40E-02	157,0	28,3	10
s12	0,00		6,43E-02	177,2	49,2	6

Tabelle 5.6 Ergebnisse der Einbildauswertung mit dem Rückblick-Kanal s12

Die Standardabweichungen für die Höhen liegen im Mittel bei 170m. Dieser Wert wird durch die nicht modellierte Marsatmosphäre beeinflusst. Absorption, Reflexionen und Streuungen in der Atmosphäre schlagen sich direkt auf die Grauwerte im Bild nieder. Diese werden wiederum direkt zur Oberflächenrekonstruktion mittels der MI-SFS Methode herangezogen. Die Reflexionsmodelle berücksichtigen die Vorgänge in der Atmosphäre nicht. Somit können die berechneten Modellgrauwerte nicht vollkommen mit den

Grauwerten aus den Bildern in Übereinstimmung gebracht werden. Bei der Betrachtung der Ergebnisse und der absoluten DGM-Höhen muss also berücksichtigt werden, dass kein Atmosphärenmodell für den Mars verwendet wurde.

Ein zweiter Teil der Auswertung besteht in der visuellen Kontrolle des erzeugten DGMs und dem Vergleich mit den Sollwerten. Im Folgenden werden die 3D-Ansichten vorgestellt, die aus der Prozessierung des Vorblickkanals s22 hervorgegangen sind. Auf die Darstellung des DGMs für den Rückblickkanal s12 wurde verzichtet, da keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind.

In allen drei Ausgabe-DGMs sind die zwei markantesten Geländeformen, der kleine Krater in der süd-westlichen Ecke und der große Krater in der nord-östlichen Ecke, deutlich sichtbar. Beim Vergleich mit dem Referenz-DGM fallen in den Kleinstrukturen erhebliche Unterschiede auf. Das Eingabe-DGM mit 75m Auflösung zeigt neben den beiden Kratern nur ein paar Mulden und Erhebungen, die über das Gelände verteilt sind. In den mit MI-SFS erzeugten DGMs werden sehr feine Strukturen sichtbar, wie zum Beispiel linienförmige Rücken, die das Auswertungsgebiet zwischen den beiden Kratern durchziehen. Diese Strukturen finden sich auch in den Orthophotos wieder (vgl. Abbildung 5.13) und bestätigen damit dieses Ergebnis.

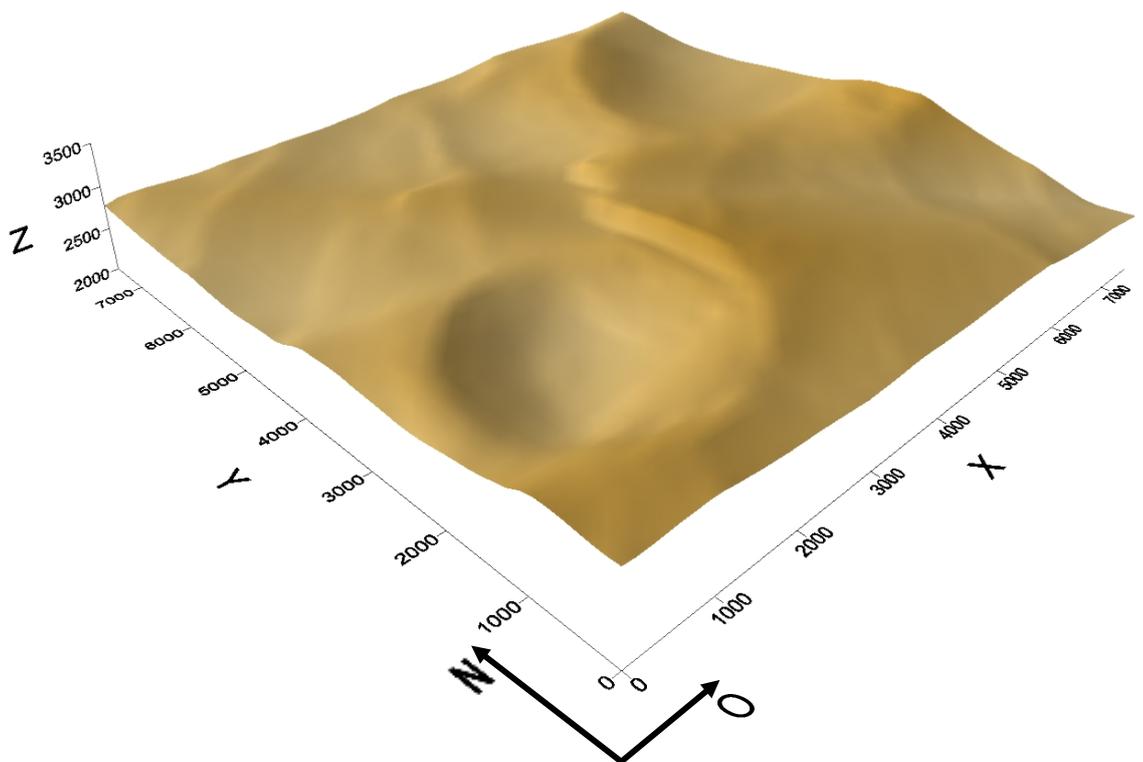


Abbildung 5.10 Rekonstruierte Oberfläche aus s22, Näherungs-DGM mit Maßstab 1.0

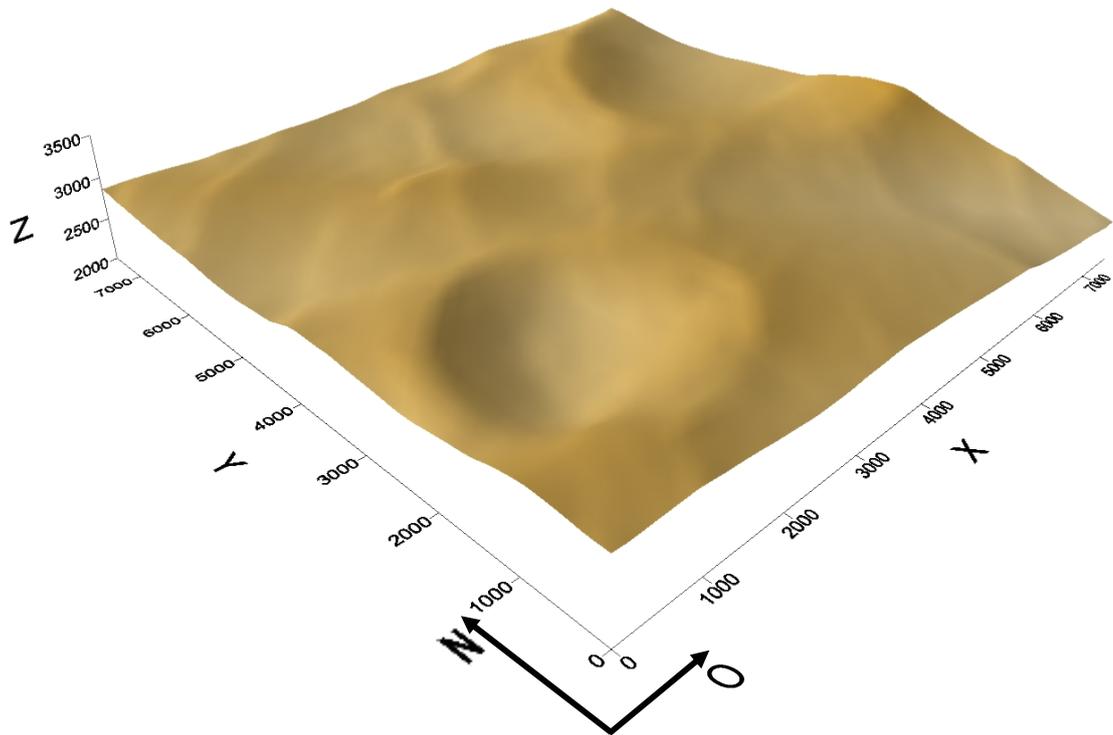


Abbildung 5.11 Rekonstruierte Oberfläche aus s22, Näherungs-DGM mit Maßstab 0.5

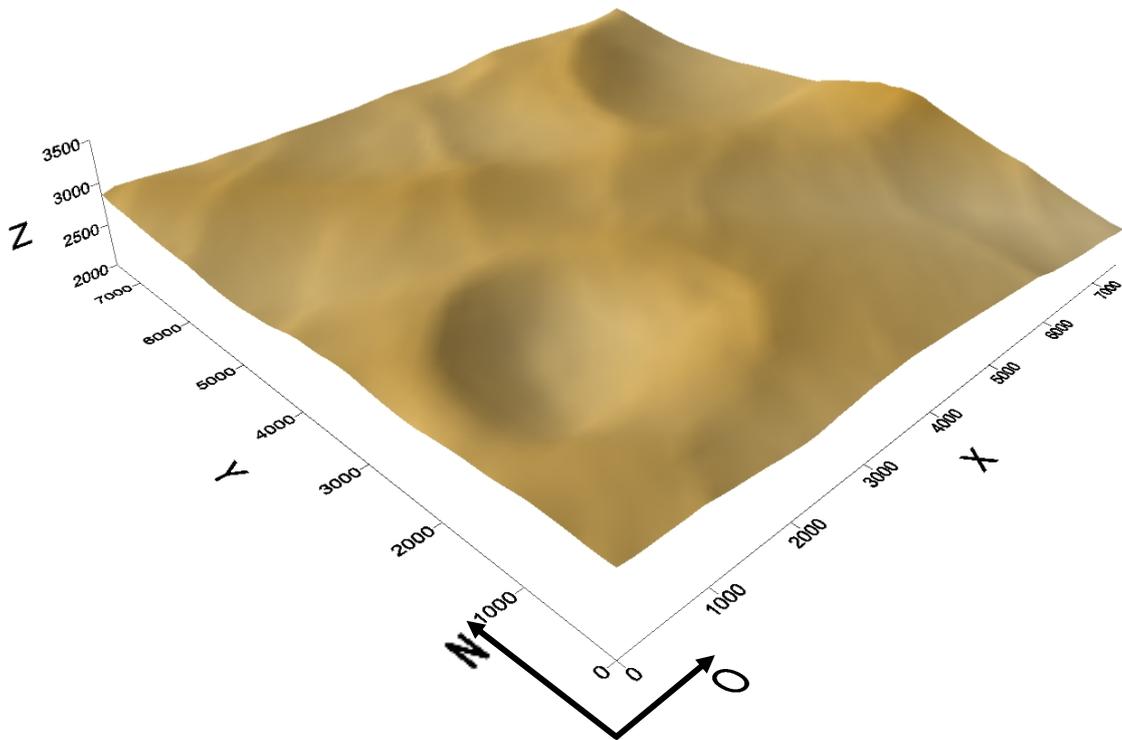


Abbildung 5.12 Rekonstruierte Oberfläche aus s22, Näherungs-DGM mit Maßstab 0.0

Die drei Ergebnis-DGMs mit unterschiedlichen Maßstäben für das Näherungs-DGM unterscheiden sich nur partiell. Die Kleinstrukturen der Oberfläche sind in allen drei DGMs identisch. Bei dem DGM mit Maßstabsfaktor 1.0 bilden sich im Zentrum des Gebietes Strukturen heraus, die nicht in den Bildern nachvollzogen werden können. Woraus diese Formation hervorgeht, konnte noch nicht geklärt werden. Dem visuellen Eindruck nach zu urteilen, stimmt die Topographie der Höhenmodelle jedoch sehr gut mit den Bildern überein. Hier zeigt sich auch deutlich, was der MI-SFS Algorithmus ohne die Vorgabe einer Topographie und nur mit einer Ebene als Näherung leisten kann: Das Ergebnis mit Maßstabsfaktor 0.0 ist den anderen ebenbürtig.

Die Gegenüberstellung der Modellgrauwerte mit den beobachteten Grauwerten aus den Bildstreifen verdeutlicht die Güte der Ergebnisse. Abbildung 5.13 zeigt in der oberen Zeile links die beobachteten Grauwerte und rechts die Modellgrauwerte, beide berechnet mit dem Näherungs-DGM aus MOLA-Daten. In der unteren Zeile befinden sich links das Orthophoto und rechts die Modellgrauwerte, beide auf der Grundlage des generierten Geländemodells aus dem Vorblickkanal s22 und dem Näherungs-DGM mit dem Maßstab 1.0 (vgl. Abbildung 5.10).

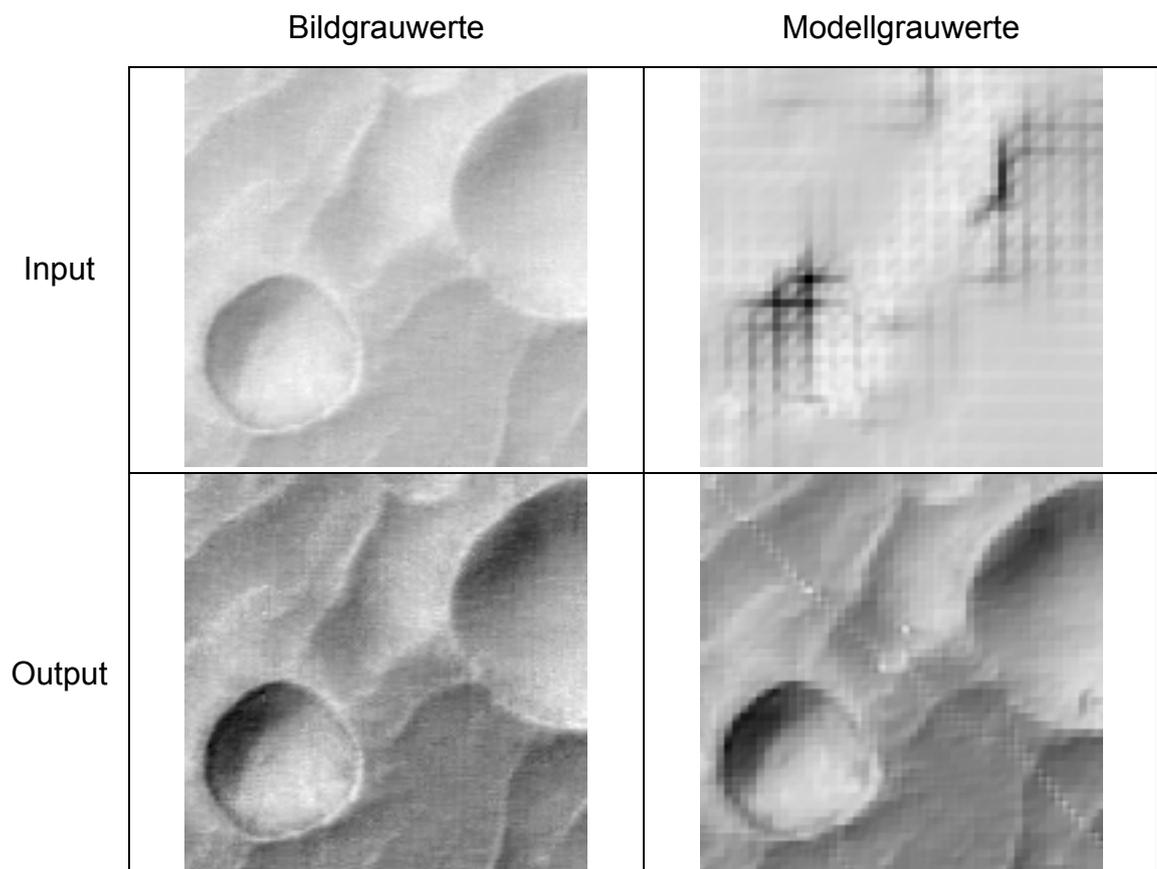


Abbildung 5.13 Vergleich Orthophotos – Modellgrauwertbilder aus s22

Das Modellgrauwertbild rechts unten enthält eine weiße Linie, die zwischen den beiden Kratern verläuft. Der Vergleich mit dem Orthophoto zeigt, dass eine solche Struktur in den Bilddaten nicht wahrgenommen werden kann. In den dreidimensionalen Darstellungen der Oberfläche ist sie als Senke enthalten, die von Nord-Westen nach Süd-Osten verläuft. Diese Struktur ist ortsgebunden, da sie sich bei einer Änderung der Gebietsgröße weiterhin zwischen den Kratern befindet. Welche Ursache dieser Senkenbildung zu Grunde liegt, konnte bis jetzt nicht geklärt werden.

Deutlich weist das Modellgrauwertbild rechts unten eine Rasterstruktur auf, die durch die Anzahl von 3x3 Rasterelementen pro Masche verursacht wird. Im nächsten Kapitel 5.2 wird zusätzlich ein Bildausschnitt mit 2x2 Rasterelementen vorgestellt, in welchem die Pixelstrukturen minimiert wurden und der Unterschied veranschaulicht wird.

5.2 Mehrbildauswertung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Mehrbildauswertung vorgestellt werden. Zunächst werden die beiden Stereokanäle gemeinsam in die Auswertung eingebracht und anschließend zusätzlich der Nadirkanal eingeführt.

Bei einer Mehrbildauswertung ist es nicht mehr nötig, einen Maschenpunkt des zu rekonstruierenden DGMs mit einer festen Höhe zu belegen. Absolute Höhen ergeben sich hier durch den Schnitt von Bildstrahlen in einem Objektpunkt aus den Vor-, Rück- und Nadir-Bildern (siehe Abbildung 5.14).

Durch die Verwendung mehrerer Bilder, liegen mit jedem hinzugefügten Bild zusätzliche, unabhängige Beobachtungen vor. Die Anzahl der Beobachtungen erhöht sich bei gleich bleibender Anzahl der Unbekannten (DGM-Höhen, A_N pro Bild). Somit nimmt durch die zunehmende Redundanz die Stabilität der Ausgleichung zu.

Für die Mehrbildauswertung werden, wie bei der Einbildauswertung, das 75-Meter-DGM als Referenz sowie das MOLA-DGM für Näherungshöhen verwendet (siehe Abbildungen 5.5, 5.6). Die hier gezeigten 3D-Ansichten der Oberfläche sind ebenfalls dem Referenz-DGM farblich angepasst und befinden sich im gleichen Koordinatensystem.

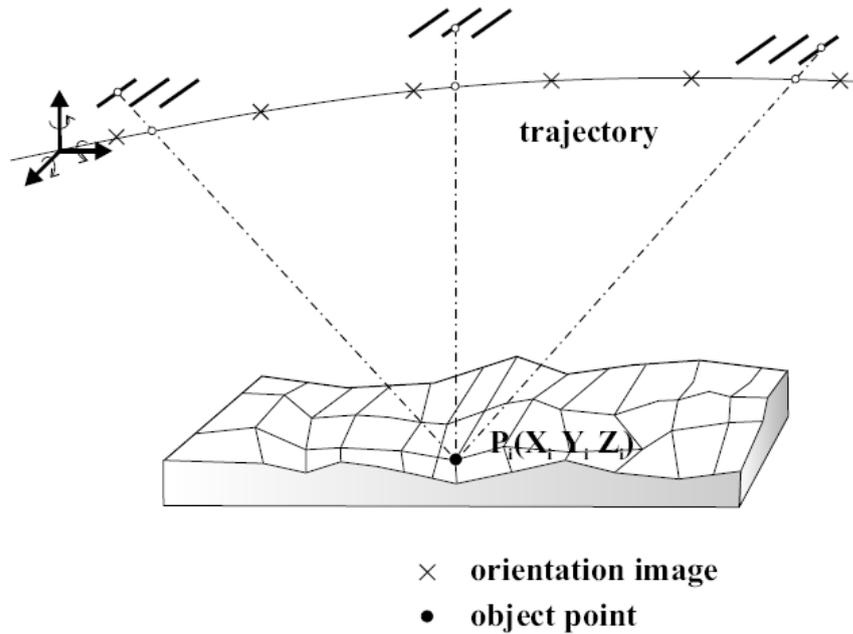


Abbildung 5.14 Schnitt der Bildstrahlen aus Vor-, Nadir- und Rückbilck in einem Objektpunkt P

Die Tabelle 5.7 zeigt die Ergebnisse der Auswertung mit den beiden Stereokanälen.

Bild 1	Bild 2	m_{DGM}	$\lambda(\alpha)$ 1	$\lambda(\alpha)$ 2	A_N 1 [W sr ⁻¹ m ⁻²]	A_N 2 [W sr ⁻¹ m ⁻²]	s [m]	Z_0 [m]	Anzahl Iterationen
s22	s12	1,00			5,95E-02	6,38E-02	157,5	-48,6	8
s22	s12	0,50	0,1	0,3	5,98E-02	6,40E-02	166,5	-32,3	7
s22	s12	0,00			5,98E-02	6,41E-02	168,6	-32,3	8

Tabelle 5.7 Ergebnisse der Mehrbildauswertung mit zwei Stereokanälen

Im Mittel betragen die Standardabweichungen für die Höhen 165m und die Abweichung gegenüber dem Referenz-DGM 40m. Die Werte sind in ihrer Größenordnung mit den Ergebnissen der Einbildauswertung vergleichbar. Durch die zusätzliche Anzahl von Grauwerten, die zur Oberflächenrekonstruktion herangezogen werden können, erhalten die Ergebnisse der Mehrbildauswertung eine höhere Zuverlässigkeit. Die Mehrbildauswertung bestätigt somit die Güte der Einbildauswertung.

Zu den zwei Stereokanälen soll nun als dritter Bildstreifen der Nadirkanal einbezogen werden. Die Tabelle 5.8 zeigt die Ergebnisse.

Bild	Bild	Bild	m_{DGM}	\angle	\angle	\angle	A_N	A_N	A_N	s	Z_0	Anzahl Iterationen
1	2	3		1	2	3	1	2	3	[m]	[m]	
s22	s12	Nadir	1,00				5,95E-02	6,38E-02	6,20E-02	157,5	-53,8	8
s22	s12	Nadir	0,50	0,1	0,3	0,2	5,99E-02	6,41E-02	6,24E-02	170,9	-41,8	8
s22	s12	Nadir	0,00				6,00E-02	6,42E-02	6,25E-02	176,6	-41,6	9

Tabelle 5.8 Ergebnisse der Mehrbildauswertung mit zwei Stereokanälen und dem Nadirkanal

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, trägt der Nadir-Kanal, trotz seiner vertikalen Blickrichtung, zusätzlich zur Stabilisierung der Ausgleichung bei. Diese Auswertung bestätigt zusätzlich die vorangegangenen Resultate.

Des Weiteren ist bemerkenswert, dass bei den Einbildauswertungen, sowie bei den Mehrbildauswertungen mit zwei Stereokanälen, nicht für alle DGM-Maschenpunkte eine Höhe bestimmt werden konnte. Ausschließlich bei der Mehrbildauswertung mit drei Bildstreifen gelangten alle Auswertungen zur vollständigen Konvergenz. Tabelle 5.9 zeigt, wie die einzelnen Auswertungen beendet wurden.

Bild	Bild	Bild	m_{DGM}	vollständige Konvergenz der Auswertung	Anzahl der DGM-Punkte ohne zugewiesene Höhe
1	2	3			
s22	-	-	1,00	nein	3
s22	-	-	0,50	ja	-
s22	-	-	0,00	nein	2
s12	-	-	1,00	nein	9
s12	-	-	0,50	nein	3
s12	-	-	0,00	nein	62
s22	s12	-	1,00	nein	2
s22	s12	-	0,50	nein	3
s22	s12	-	0,00	nein	2
s22	s12	Nadir	1,00	ja	-
s22	s12	Nadir	0,50	ja	-
s22	s12	Nadir	0,00	ja	-

Tabelle 5.9 Übersicht über die Konvergenz der Ergebnisse

Zur visuellen Interpretation der Ergebnisse der Mehrbildauswertung werden die rekonstruierten Oberflächen, erzeugt mit den drei Bildstreifen s22, s12 und Nadir, vorgestellt.

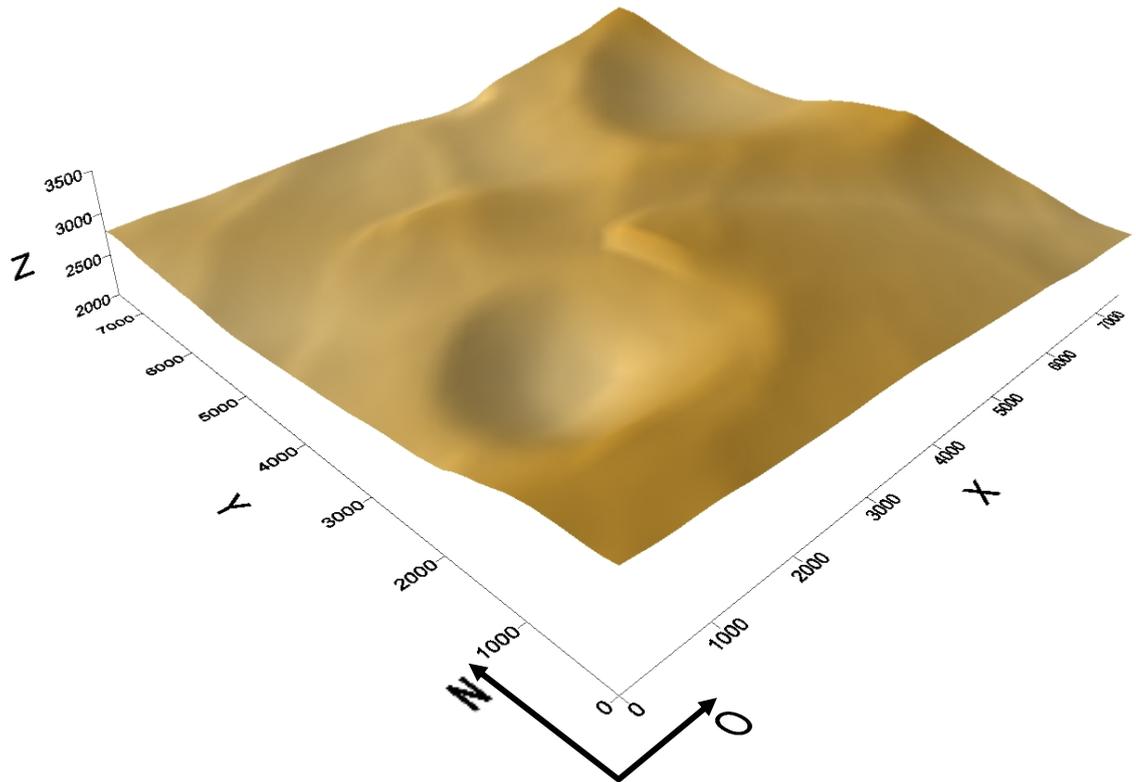


Abbildung 5.15 Rekonstruierte Oberfläche aus s22, s12, Nadir, Näherungs-DGM mit Maßstab 1.0

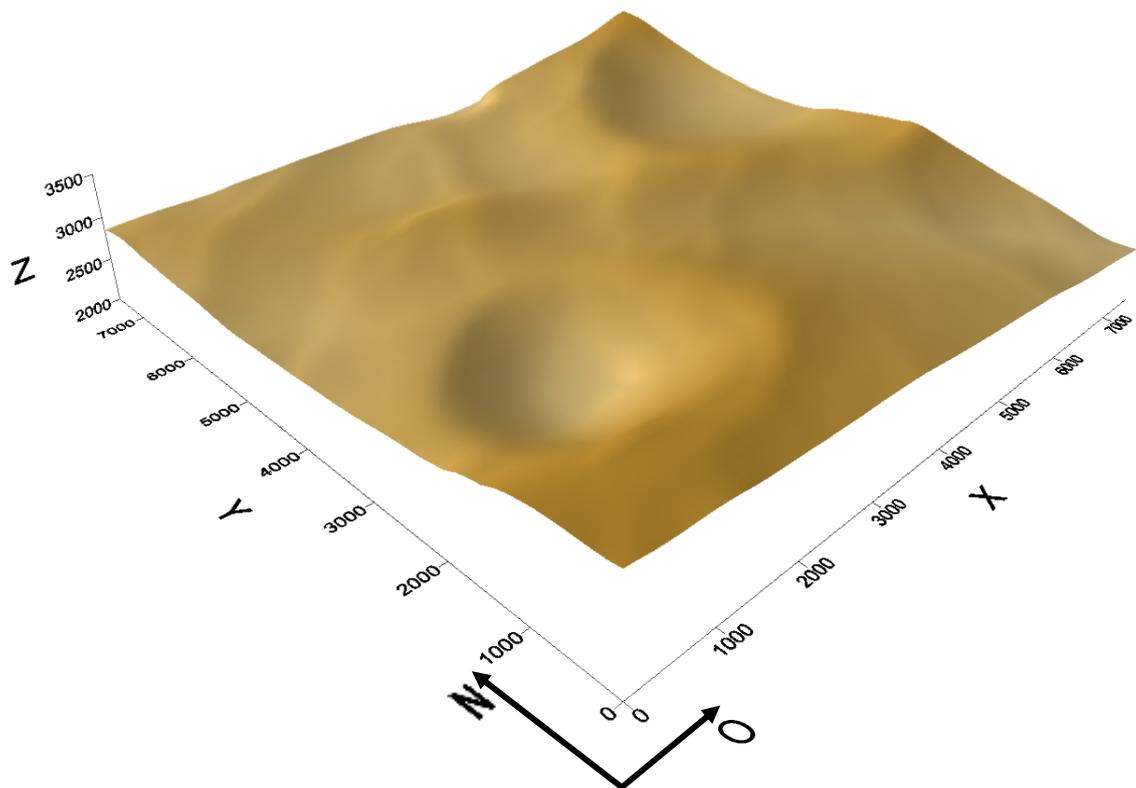


Abbildung 5.16 Rekonstruierte Oberfläche aus s22, s12, Nadir, Näherungs-DGM mit Maßstab 0.5

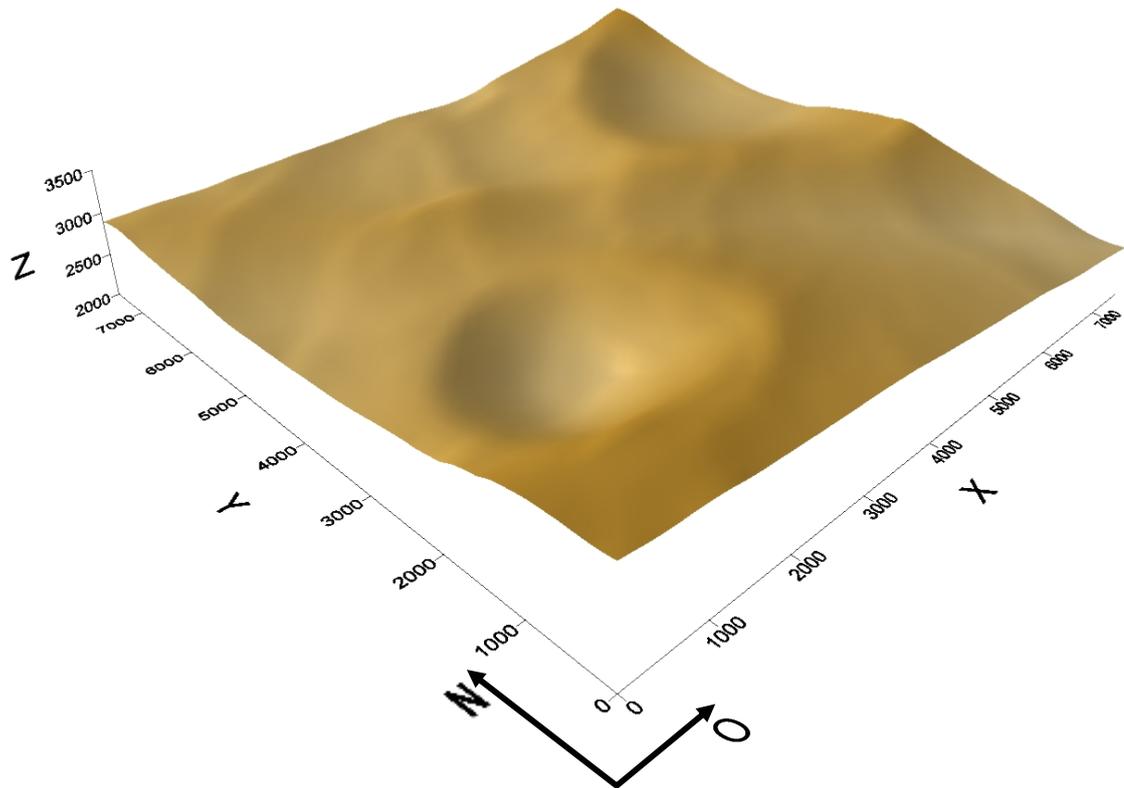


Abbildung 5.17 Rekonstruierte Oberfläche aus s22, s12, Nadir, Näherungs-DGM mit Maßstab 0.0

Die Oberflächen sind in ihrer Form denen der Einbildauswertung gleichwertig. Identische Kleinstrukturen finden sich ebenfalls in diesen DGMs wieder. Es fällt auf, dass die Rücken, welche das Gebiet von Süd-Westen nach Nord-Osten durchziehen sowie die Kraterränder, nicht so stark ausgeprägt sind, wie bei den Oberflächen aus der Einbildauswertung. Das Gebiet wird ebener dargestellt, weil jetzt nicht nur ein seitlich blickender Stereokanal, sondern drei Kanäle mit verschiedenen Perspektiven auf die Topographie zur Rekonstruktion herangezogen werden.

Die Modellgrauwertbilder und Orthophotos, erzeugt mit drei Bildstreifen, werden in der folgenden Übersicht gegenübergestellt. Es wird hier die Auswertung mit einem Maßstab von 1.0 des Näherungs-DGMs gezeigt (vgl. Abbildung 5.15).

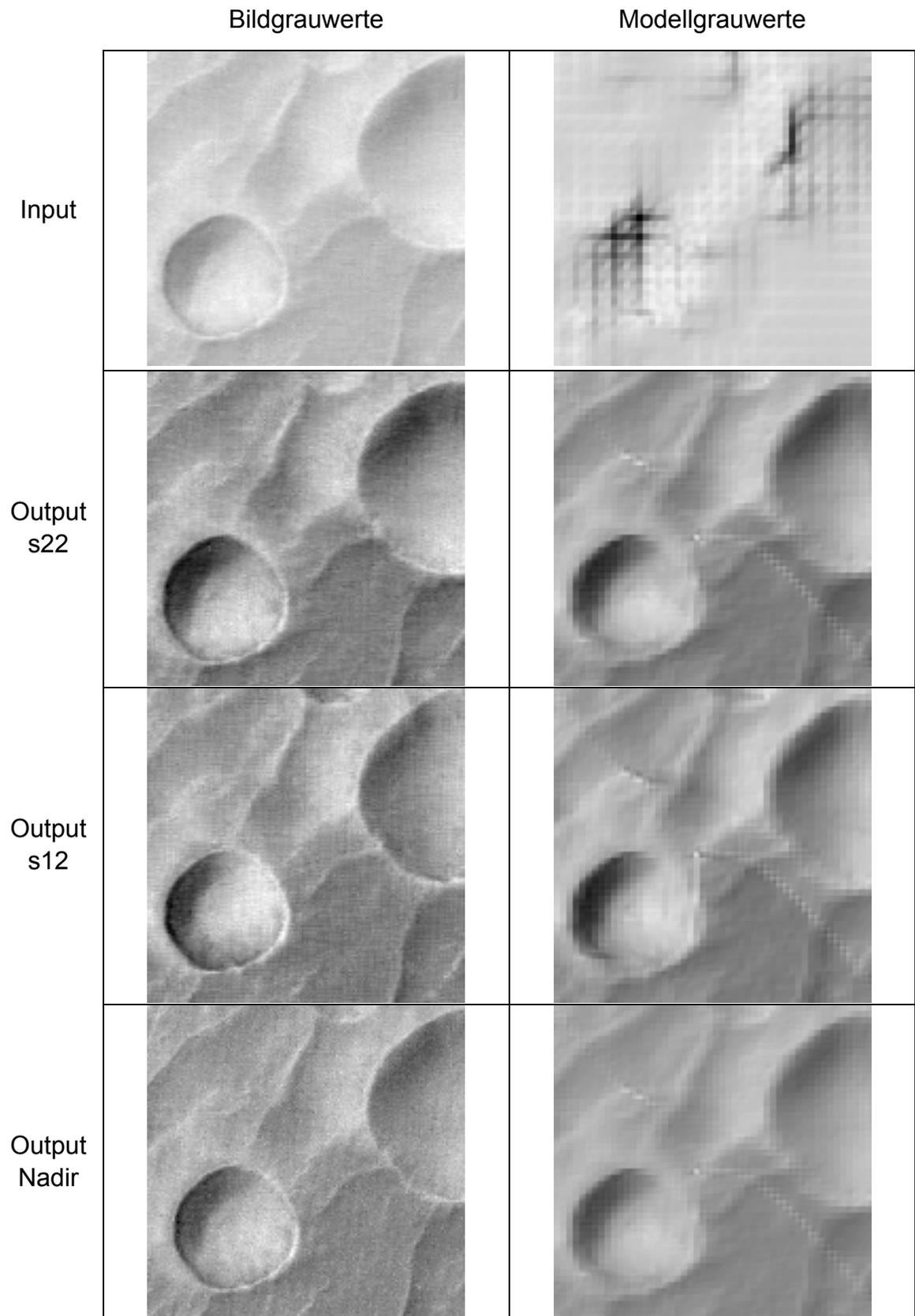


Abbildung 5.18 Vergleich Orthophotos – Modellgrauwerte aus der Mehrbildauswertung mit drei Bildstreifen

Auffällig ist in Abbildung 5.18 das verschwommen wirkende Modellgrauwertbild, erzeugt aus dem Nadirkanal. Der Grund dafür ist wahrscheinlich die vertikale Blickrichtung dieses Sensors. Die Kleinstrukturen sind aber auch im Modellgrauwertbild des Nadirkanals gut sichtbar.

Die Rasterstruktur in den Modellgrauwertbildern kann mit der Wahl von 2x2 Rasterelementen pro Masche minimiert werden. Die zwei Ausschnitte in der folgenden Abbildung 5.19 aus dem Modellgrauwertbild Vorblickkanal s22 zeigen eine deutliche Verbesserung der Auflösung. Allerdings ist auch ein eindeutiger Anstieg der Rechenzeit zu berücksichtigen.

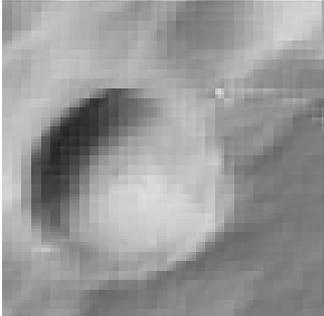
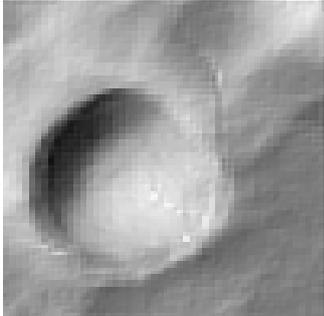
Ausschnitt Modellgrauwertbilder, s22 (Vergrößerung 120%)	
3x3 Rasterelemente 150m Maschenweite	2x2 Rasterelemente 100m Maschenweite
	

Abbildung 5.19 Vergleich der Bildausschnitte: 9 Rasterelemente pro Masche und 4 Rasterelemente pro Masche

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die Zeilenbildgeometrie konnte erfolgreich in das MI-SFS Programm integriert werden. Es ist nun möglich, gleichermaßen auf der Grundlage von Flächensensordaten sowie von Zeilenbilddaten der HRSC, Oberflächen mit Hilfe des MI-SFS Algorithmus zu rekonstruieren. Durch die neu eingeführte interne Programmsteuerung werden für jeden Bildtyp die richtigen Programmabschnitte und Funktionen ausgeführt. Eingabeparameter werden einheitlich mit den VICAR-Funktionen eingelesen, die vom Bildverarbeitungssystem zur Verfügung gestellt werden. Ebenso wird der Zugriff auf Bilddaten und DGMs sowie deren Labelinformationen durch VICAR-Funktionen geregelt.

Die vorliegenden Ergebnisse der MI-SFS Auswertung zeigen, dass die Oberflächenrekonstruktion auf der Grundlage von HRSC-Bildern der Mars Express Mission erfolgreich verlaufen ist. Selbst bei Einbildauswertungen konnten zufrieden stellende Ergebnisse bei der Oberflächenrekonstruktion erzielt werden. Bestätigt wurden diese Ergebnisse der Einbildauswertung durch die Mehrbildauswertungen, die aufgrund zusätzlicher unabhängiger Beobachtungen eine größere Zuverlässigkeit aufweisen.

Der Vergleich der Topographie in den HRSC-Bilddaten und den rekonstruierten Oberflächen zeigt eine sehr große Übereinstimmung. Die markanten Geländeformen des Auswertungsgebietes, die zwei Krater, sind sehr deutlich ausgebildet. Selbst Kleinstrukturen, wie beispielsweise Rücken und Senken, die im Referenz-DGM nicht zu erkennen sind, werden rekonstruiert.

Der MI-SFS Algorithmus zeigte seine Stärke auch bei der Auswertung mit einer Ebene als Näherung für die unbekanntes DGM-Höhen. Auf der Grundlage dieser mittleren Geländehöhe aus dem MOLA-DGM wurde eine Oberfläche erzeugt, die im Verhältnis zu den übrigen Oberflächenrekonstruktionen gleichwertig ist.

Die Beurteilung der Standardabweichungen der Höhen und der Abweichungen gegenüber dem Referenz-DGM zeigt eine große Differenz zwischen Soll und Ist. Die Höhen der DGM-Maschen werden direkt aus den beobachteten Grauwerten abgeleitet. Wie in den Ergebnissen ersichtlich, nimmt die Marsatmosphäre großen Einfluss auf die Grauwertentstehung in den HRSC-Bildern. Die absoluten Höhenangaben der rekonstruierten DGMs wurden ungünstig von der Atmosphäre beeinflusst. Um auch absolute Höhenangaben mit hoher Genauigkeit erhalten zu können, sollte das MI-SFS Programm in Zukunft dahingehend erweitert werden, dass diese Atmosphäreneinflüsse berücksichtigt werden.

Darüber hinaus sollte der Programm Quellcode einer Optimierung unterzogen werden. Somit könnten Rechenzeit gespart und die Auswertungen beschleunigt werden. Bei einer großen Anzahl von Unbekannten nimmt insbesondere das Invertieren der Normalgleichungsmatrix sehr viel Zeit in Anspruch. Hier könnten speziell angepasste Algorithmen zur Bearbeitung von Bandmatrizen eingesetzt werden, die diesen Vorgang erheblich beschleunigen würden (Piechullek, 2000). Anschließend könnten auch Gebiete mit größerer Ausdehnung in einer annehmbaren Rechenzeit bearbeitet werden.

In Zukunft wäre auch die Kombination von Matching und MI-SFS Programmen denkbar, so dass Bereiche, in denen das Matching nicht ausreichende Verknüpfungspunkte liefert, programmseitig durch das MI-SFS Verfahren ergänzt werden. So könnte das MI-SFS Programm im operationellen Einsatz seinen Beitrag zur Erzeugung lückenloser und hochgenauer DGMs für die gesamte Marsoberfläche leisten.

Die HRSC wird voraussichtlich noch bis Ende 2007 neue Bilder vom Mars liefern. Dem Ziel, eine globale Abdeckung mit hochauflösenden HRSC-Daten der Marsoberfläche zu erreichen, wird damit näher gekommen.

Die ESA setzt in ihrem AURORA-Programm die Erkundung unseres Sonnensystems fort (ESA, 2006b). Anfang dieses Jahres schwenkte Venus-Express, ein nahezu baugleicher Orbiter zu Mars Express, in eine Umlaufbahn unseres zweiten Nachbarplaneten ein. Das erfolgreiche Konzept dieser Sonde wird weiterhin genutzt und wird neue Erkenntnisse bei der Erkundung der Venus liefern.

In den nächsten Jahren soll die Erkundung allerdings auf den Erdenmond und den Mars konzentriert werden. Die Frage nach der Existenz von Wasser und die damit verbundene Suche nach vergangenem oder präsentem Leben auf dem Mars, beschäftigt die Wissenschaft und führte zu der Planung weiterer Marsmissionen. Dazu wird voraussichtlich 2011 die ExoMars Mission einen Rover auf der Oberfläche absetzen, der Forschungen zur Existenz von Leben auf dem Mars anstellen soll. Im nächsten Schritt könnten bis 2015 Bodenproben vom Mars zurück zur Erde gebracht werden. Das Langzeitziel ist die Entsendung einer bemannten Marsmission in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts. Vornehmlich werden also Missionen geplant, die eine Landung auf der Marsoberfläche vorsehen.

Die Erkundung mit Landerobotern bedarf einer möglichst genauen dreidimensionalen Vermessung der Marsoberfläche. Aufgrund von hochauflösenden Bildkarten können Koordinaten für bestmögliche Landezonen ausgewählt und mit einer präzisen Höheninformation aus digitalen Geländemodellen der meist schwierige Landevorgang optimiert werden.

Darüber hinaus stellt eine genaue dreidimensionale Kenntnis der Marsoberfläche die Basis für alle wissenschaftlichen Disziplinen dar, die sich mit der Erkundung des Mars auseinandersetzen.

Das MI-SFS Verfahren, angewandt auf HRSC-Bilder der Mars Express Mission, trägt somit direkt zur Erzeugung von Grundlagedaten für die weitere Marsforschung bei. Die durch MI-SFS verbesserten DGMs der Marsoberfläche dienen als Grundlage für hochgenaue Geländemodelle, Orthophotos sowie topographische Bildkarten.

7 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., SCHOLTEN, F., EBNER, H., HEIPKE, C., NEUKUM, G., 1993: Two camera experiments on the Mars 94/96 missions, *Geoinformationssysteme*, (6) 4, S.11 ff.
- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G., 2004: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200000", Sammelband „Vorträge 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF“, Halle.
- BRAND, R., OHLHOF, T., STEPHANI, M., 1997: Processing and Display of Three-Line Imagery at a Digital Photogrammetric Workstation, *IntArchPhRS*, (31), Band 2, S.72 ff.
- CHICARRO, A., MARTIN, P., TRAUTNER, R., 2004: The Mars Express Mission: An Overview; ESA Special Publications SP-1240, MARS EXPRESS - The Scientific Payload.
- DEEN, R., 1992: The VICAR File Format, Multimission Image Processing Laboratory, http://www-mipl.jpl.nasa.gov/vicar/vic_file_fmt.html (Stand: 05.06.06)
- DEEN, R., 1998a: VICAR Run-Time Library Reference Manual, Multimission Image Processing Laboratory, <http://www-mipl.jpl.nasa.gov/RTL/> (Stand: 05.06.06)
- DEEN, R., BOLEF, L., 1998b: Building and Delivering VICAR Applications, Multimission Image Processing Laboratory, <http://rushmore.jpl.nasa.gov/buildapps/> (Stand: 05.06.06)
- DORRER, E., MAYER, H., HAASE, Y., OSTROVSKIY, A., RENTER, J., RENTSCH, M., REZNIK, S., NEUKUM, G., und das HRSC Co-Investigator Team, 2005: Verbesserung räumlicher Daten durch „Shape-from“Shading“, *DGPF*, (5/2005), S.403 ff.
- DUXBURY, E., JENSEN, D., 1994: VICAR User's Guide, <http://www-mipl.jpl.nasa.gov/PAG/public/vug/vugfinal.html> (Stand: 05.06.06)
- DUXBURY, T. C., KIRK, R. L., ARCHINAL, B. A., NEUMANN, G. A., 2002: Mars Geodesy/Cartography Working Group Recommendations on Mars Cartographic Constants and Coordinates Systems, *ISPRS Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottawa 2002.
- EBNER, H., SPIEGEL, M., BAUMGARTNER, A., GIESE, B., NEUKUM, G., and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Improving the exterior orientation of Mars Express HRSC imagery, *IntArchPhRS*, (35).
- ELIASON, E. M., 2006: Clementine Mission: NASA's Information Page, Planetary DataSystem, U.S. Geological Survey, <http://astrogeology.usgs.gov/Projects/Clementine/nasaclem/clemhome.html> (Stand: 05.06.06)
- ESA, 2006a: Mars Express, http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/index.html (Stand: 05.06.06)
- ESA, 2006b: The European Space Exploration Programme Aurora, <http://www.esa.int/SPECIALS/Aurora/index.html> (Stand: 05.06.06)
- GWINNER, K., SCHOLTEN, F., GIESE, B., OBERST, J., JAUMANN, R., SPIEGEL, M., SCHMIDT, R., NEUKUM, G., und das HRSC Co-Investigator Team, 2005: Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten, *DGPF*, (5/2005), S.387 ff.

- HEIPKE, C., SCHMIDT, R., BRAND, R., OBERST, J., NEUKUM, G., and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Performance of Automatic Tie Point Extraction Using HRSC Imagery of The Mars Express Mission, *IntArchPhRS*, (35), Band 4, S.846 ff, Istanbul 2004.
- HEIPKE, C., ALBERTZ, J., ATTWENGER, M., BUCHROITHNER, M., DORNINGER, P., DORRER, E., GEHRKE, S., GWINNER, K., LEHMANN, H., MAYER, H., OSTROVSKIY, A., PACHER, G., RENTSCH, M., SCHMIDT, R., SCHOLTEN, F., SPIEGEL, M., STILLA, U., NEUKUM, G., and the HRSC Co-Investigator Team, 2005: HRSC auf Mars Express - Photogrammetrische und kartographische Auswertungen, *ZfV* 130 (2005), Nr. 6, S. 379 ff.
- HICKL, K., 1999: Digitale Bildzuordnung mit Dreizeilenbilddaten der MOMS-02/D2 Mission, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München 1999.
- JACOBSEN, K., 1997: Program System BLUH: BLTRA Transformation of National Net, Geographic and Geocentric Coordinates or Image Orientation, <http://ipi216.ipi.uni-hannover.de/html/service/bluh/bluh.htm> (Stand: 05.06.06)
- KORNUS, W., LEHNER, M., BLECHINGER, F., PUTZ, E., 1996: Geometric Calibration of the stereoscopic CCD-Linescanner MOMS-2P, *IntArchPhRS*, (31).
- LOHSE, V., HEIPKE, C., KIRK, R. L., 2005: Derivation of Planetary Topography using Multi-Image Shape-from-Shading, im Druck.
- McEWEN, A. S., 1991: Photometric Functions for Photoclinometry and Other Applications, *Icarus* (92), S.298 ff.
- NASA, Jet Propulsion Laboratory, NASA's Mars Exploration Program, 2006: <http://mars.jpl.nasa.gov/missions/past/> (Stand: 05.06.06)
- NEUKUM, G., 1997: Ground Bases Geometric Calibration of the Airborne Camera HRSC-A, DLR Institut für Planetenerkundung, Mars96 HRSC/WAOSS Science and Mission.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R. and the HRSC Co-Investigator and Experiment Team, 2004: HRSC: the High Resolution Stereo Camera of Mars Express; ESA Special Publications SP-1240, MARS EXPRESS - The Scientific Payload.
- OBERST, J., ROATSCH, T., GIESE, B., WÄHLISCH, M., SCHOLTEN, F., WINNER, K., MATZ, K.-D., HAUBER, E., JAUMANN, R., ALBERTZ, J., GEHRKE, S., HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M., VAN GASSELT, S., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: The mapping performance of the HRSC / SRC in Mars orbit, *IntArchPhRS*, (35), Band 4, S.1318 ff, Istanbul 2004.
- OHLHOF, T., KORNUS, W., 1994: Geometric Calibration of Digital Three-Line CCD Cameras, *IntArchPhRS*, (30), Band 1, S.71 ff.
- OHLHOF, T., 1996: Lokale, regionale und globale Punktbestimmung mit Dreizeilenbilddaten und Bahninformation der Mars-96-Mission, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 445.
- PIECHULLEK, C., 2000: Oberflächenrekonstruktion mit Hilfe von einer Mehrbild Shape-from-Shading Methode. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 518.

- ROSENBERG, N., 2001: Geometrische Auswertung von Flugzeug-Zeilenscanneraufnahmen, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Universität Hannover, 2001
- SCHOLTEN, F., SUJEW, S., WEWEL, F., FLOHRER, J., JAUMANN, R., LEHMANN, F., PISCHEL, R., NEUKUM, G., 1999: The High Resolution Stereo Camera (HRSC) – Digital 3D-Image Acquisition, Photogrammetric Processing and Data Evaluation. Sensors and mapping from space, Hannover, 1999
- SPIEGEL, M., BAUMGARTNER, A., EBNER, H., 2003: Orientation of Mars Express/HRSC Imagery Using Laser Altimeter Data as Control Information, ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003, October 6-8, Hannover.
- TABER, W. L., BACHMAN, N. J., 2005: SPICE Documents for C Toolkits - SPK Required Reading, Navigation Ancillary Information Facility, ftp://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/toolkit_docs/C/html/individual_docs/spk.html (Stand: 05.06.06)
- ZHANG, R., TSAI, P.-S., CRYER, J. E., SHAH, M., 1999: Shape from Shading: A Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, S.670 ff.

Dank

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Thomas Kersten (HCU Hamburg) und Herrn Dipl.-Ing. Ralph Schmidt (Universität Hannover) danke ich für ihre sehr gute Betreuung. Sie unterstützen mich umfangreich und standen mir jederzeit bei Fragen zur Seite. Erst in der guten Zusammenarbeit zwischen der HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik (Prof. Dipl.-Ing. Thomas Kersten) und dem Institut für Photogrammetrie und Geoinformation der Universität Hannover (Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke) wurde meine Diplomarbeit ermöglicht. Herrn Diplom-Ingenieur Volker Lohse danke ich für seine engagierte Begleitung in Sachfragen der Programmierung und des SFS. Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin Anja Valett, die mich mit ihren abwechslungsreichen Ideen stets unterstützte und immer für mich da war.

Erklärung (§23(5) PSO)

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den

.....
(Stephen Rump)