

Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten für HRSC-Bilder der Mars Express-Mission

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ralph Schmidt

HANNOVER 2008

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer, Leibniz Universität Hannover
Referent: Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke, Leibniz Universität Hannover
Korreferenten: Univ.-Prof. Dr. Gerhard Neukum, Freie Universität Berlin
Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön, Leibniz Universität Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juni 2008

Zusammenfassung

Seit Anfang 2004 liefert die deutsche Zeilenscanner-Kamera HRSC (High Resolution Stereo Camera) an Bord der europäischen Sonde Mars Express hochaufgelöste stereoskopische Bildstreifen, mit denen zum ersten Mal eine systematische photogrammetrische Auswertung eines anderen Planeten möglich wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Digitalen Bildzuordnung entwickelt, mit dem automatisch gleichmäßig verteilte hochgenaue Verknüpfungspunkte in den HRSC-Bildern bestimmt werden können. Es wurde eine Prozessierungskette erstellt, mit der sämtliche Bildstreifen der Mission operationell verarbeitet werden können. Ein manuelles Eingreifen wird so weit wie möglich vermieden, um die großen Datenmengen effizient beherrschen zu können. Neben der Prozessierung von Einzelbildstreifen wurde auch eine Methode entwickelt, die auf mehrere sich überlappende Bildstreifen, welche einen Blockverband bilden, angewandt werden kann.

Als ein zusätzlicher Teilbereich der Prozessierungskette wurden Verfahren zur Bildrekonstruktion untersucht, um Kompressionsartefakte und Rauschen in den HRSC-Bildern zu vermindern. Das Ziel dieser Bearbeitung ist es, das Verfahren der Digitalen Bildzuordnung zu stabilisieren und eine höhere Anzahl an Verknüpfungspunkten zu extrahieren, um eine gleichmäßigere Abdeckung in den Bildern zu erreichen. Diese Anforderung ist von der anschließenden Bündelausgleichung (Spiegel 2007) gegeben, die zur Relativen Orientierung der Zeilenkamera ausreichend viele Verknüpfungspunkte benötigt. Auch zur Absoluten Orientierung mittels einer Anpassung an ein global verfügbares DGM (Digitales GeländeModell) ist eine gleichmäßig verteilte und möglichst lückenlose Punktwolke erforderlich. Neben einem klassischen Gauß-Filter wurden auch aktuelle Rauschunterdrückungsalgorithmen wie z.B. die kantenerhaltende Anisotrope Diffusion untersucht. Die kantenerhaltenden Algorithmen konnten im Test mit HRSC-Daten allerdings keine Vorteile gegenüber einem 3×3 Gauß-Filter erzielen. Die Untersuchung in dieser Arbeit hat ergeben, dass im Vergleich zu ungefilterten Bildern im Schnitt 50% mehr Verknüpfungspunkte gefunden werden.

Zu den speziellen geometrischen Eigenschaften der HRSC-Daten gehören Maßstabsunterschiede, Makropixelbildung und Verzerrungen durch nicht optimal angepasste Integrationszeiten. Die HRSC-Bilder werden mit Hilfe des globalen DGMs vorentzerrt, wodurch diese speziellen Eigenschaften der Zeilenscanner-Daten bezüglich der Bildgeometrie, die die Bildzuordnung beeinträchtigen, weitgehend beseitigt werden. Die eigentliche Verknüpfungspunktsuche findet in den vorentzerrten Bildern statt, wobei zunächst in einem Ansatz basierend auf Bildpyramiden eine klassische Kreuzkorrelation durchgeführt wird. Durch die Vorentzerrung werden die Parallaxen stark verkleinert, so dass große Korrelationsfenster verwendet werden können. Diese sind wegen der oftmals nur geringen Textur in den Bildern notwendig. Danach wird die Genauigkeit der Punkte mit einem Multi-Image Least Squares-Verfahren noch gesteigert. Wie die Untersuchungen anhand von 45 Testbildstreifen in dieser Arbeit gezeigt haben, werden für die Strahlenschnitte im Durchschnitt eine hervorragende relative Genauigkeit von etwa 4 m in der Lage und 16 m in der Höhe erreicht. Dies entspricht ungefähr $1/8$ Pixel in der Lage bzw. $1/2$ Pixel in der Höhe bezüglich der durchschnittlichen Auflösung der vorentzerrten Bilder von 30 m. Der Anteil der durch die Bündelausgleichung eliminierten groben Fehler liegt bei unter 10%, was bei den anspruchsvollen HRSC-Daten ein sehr guter Wert ist. Für die geometrische Stabilität der Punkte ist noch der hohe Anteil von ca. 75% an Fünfstrahlpunkten ein wichtiger Faktor.

Während der ersten 5000 Marsumrundungen wurden von Mars Express ca. 1900 Bildstreifen von der Oberfläche aufgenommen, von denen 1396 zur Prozessierung manuell ausgewählt wurden. Die übrigen waren aufgrund von Staubstürmen, geringer Textur, Lücken in den Bilddaten, Limb-Aufnahmen, Überbelichtungen oder zu kurzen Bildern für eine photogrammetrische Bearbeitung nicht verwertbar. Von diesen 1396 Bildstreifen konnten 1138 erfolgreich mit der Bündelausgleichung verbessert werden. Gründe für das Misslingen der restlichen 258 Streifen seitens der Digitalen Bildzuordnung sind neben Gebieten mit zu geringer Textur vor allem schlechte Bildqualität. Abhilfe für dieses Problem schaffen hier nur neue Aufnahmen bei klarer Atmosphäre.

Neben der Einzelstreifenauswertung wurde anhand von zwei Beispielen die Verknüpfungspunktsuche in einem Blockverband untersucht. Hierbei hat sich gezeigt, dass in einem Block bestehend aus Bildstreifen ähnlicher Aufnahmegeometrie und guter Bildqualität flächendeckend viele Punkte hoher Genauigkeit zwischen den Streifen gefunden werden. Der Block des zweiten Beispiels ist aus Einzelstreifen aufgebaut, die über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren aufgenommen wurden. Die Bildqualität in dem über weite Strecken texturarmen Gebiet war in den radiometrisch teilweise stark unterschiedlichen Bildstreifen manchmal nicht ausreichend, um genügend Punkte für die Streifenverknüpfung zu finden. Auch in solchen Fällen müssen Bilder von guter Qualität bei klarer Atmosphäre aufgenommen werden, deren Beleuchtungsrichtungen sich nicht zu stark unterscheiden.

Schlagerworte: Photogrammetrie, Mars Express, Digitale Bildzuordnung

Summary

Since early in 2004 the German line scanner camera HRSC (High Resolution Stereo Camera) onboard the European space probe Mars Express delivers high resolution stereoscopic image strips. For the first time a systematic photogrammetric processing of a whole planet is possible with these data. Within this work a method for Digital Image Matching has been developed, which automatically determines equally distributed high-precision tie points in HRSC imagery. A processing chain has been created, which can efficiently handle large data amounts in an operational manner without manual interaction. Beside the single image strips also a method for processing of overlapping image strips from different orbits, which form an image block, has been developed.

Additionally, methods of image reconstruction have been investigated which are to decrease compression artefacts and noise in the HRSC imagery. The aim of this treatment is to stabilise the Digital Image Matching and to obtain a bigger quantity of tie points in order to achieve an equal distribution in the images. This is a requirement of the subsequent bundle adjustment (Spiegel 2007) which needs a sufficient number of tie points for the Relative Orientation. Also for the Absolute Orientation by means of an adjustment to a globally available DTM (Digital Terrain Model) an equally distributed point cloud without gaps is necessary. Beside a classic Gauss filter also recent noise reduction algorithms like edge preserving Anisotropic Diffusion have been investigated. The edge preserving algorithms were not able to yield any advantage over a simple 3×3 Gauss filter with HRSC data. The investigation in this work has shown that about 50% more points are generated than without filtering.

The special geometric characteristics of the HRSC data are scale differences, macro pixel formation and non-quadratic pixels because of suboptimal integration times. The HRSC images are prerectified using the global DTM which largely eliminates all special geometric characteristics of the line scanner data that impair the matching. The search for tie points is carried out in the prerectified images using a classic cross correlation with image pyramids. Because of the prerectification parallaxes are small so that large correlation windows can be used, which is required for the often low texture in the images. Subsequently, the accuracy of the points is improved in a multi-image least squares matching. Investigations with 45 test image strips have shown that an excellent relative accuracy of the ray intersections of 4 m in horizontal position and 16 m in height is achieved. According to a mean resolution of 30 m of the prerectified images this corresponds to about 1/8 pixel in horizontal position and 1/2 pixel in height. The percentage of blunders which have been eliminated by the bundle adjustment lies below 10%, which is a very good value concerning the difficult HRSC data. For the geometric stability of the points it is also an important factor that a high percentage of 75% 5-ray points was achieved.

During the first 5000 orbits about 1900 image strips of the Mars surface have been obtained, of which 1396 have been manually selected for processing. The rest were unsuitable because of dust storms, low texture, data gaps, limb images, overexposure or too short strips. Of these 1396 image strips 1138 were successfully improved by the bundle adjustment. The reasons for failure of the remaining 258 image strips on the part of the matching are areas with low texture and bad image quality. Only new imagery taken under a clear atmosphere will find remedy for this problem.

Beside the single strip processing two examples are investigated for tie point matching in overlapping image strips from different orbits. The first case demonstrates that very good results are obtained with strips of similar image geometry and good quality. The second example is built of strips which have been obtained over a time span of two and a half years. Image quality and radiometric characteristics vary strongly among them. The investigated block shows large areas with low texture which in some cases prevented finding enough tie points between neighbouring strips. Also in such cases imagery of good quality have to be obtained under a clear atmosphere and with similar illumination conditions.

Key Words: Photogrammetry, Mars Express, Matching

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Mars Express-Mission.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	1
1.3 Strukturierung der Arbeit.....	2
2 Marserforschung	3
2.1 Der Planet Mars.....	3
2.2 Photogrammetrisch bedeutsame Missionen.....	4
2.2.1 Mariner 9.....	4
2.2.2 Viking.....	5
2.2.3 Mars Global Surveyor (MGS).....	6
2.2.3.1 Missionsüberblick.....	6
2.2.3.2 Instrumente.....	7
2.2.3.3 Mars Orbiter Camera (MOC).....	8
2.2.3.4 Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA).....	8
2.2.4 Mars 96.....	10
2.3 Mars Express.....	12
2.3.1 Missionsüberblick.....	12
2.3.2 Instrumente.....	14
2.3.3 High Resolution Stereo Camera (HRSC).....	14
2.3.3.1 Übersicht über die Kamera.....	14
2.3.3.2 Kalibrierung.....	17
2.3.3.3 Bilddaten.....	19
2.3.3.4 Bahn- und Lagedaten.....	20
2.4 Weitere aktuelle und zukünftige Missionen.....	22
3 Bisherige Arbeiten	23
3.1 Digitale Bildzuordnung.....	23
3.1.1 Lokale und globale Verfahren.....	23
3.1.1.1 Lokale Verfahren.....	23
Korrelation.....	23
Kleinste Quadrate Zuordnung.....	24
Mehrpunktzuordnung.....	25
Zuordnung im Objektraum.....	25
3.1.1.2 Globale Verfahren.....	25
3.1.2 Flächen- und merkmalsbasierte Verfahren, Relationale Zuordnung.....	26
3.1.2.1 Grundsätzliche Unterschiede.....	26
3.1.2.2 Zuordnung über Punkte.....	27
3.1.2.3 Zuordnung über Linien und Flächen.....	27
3.1.2.4 Relationale Zuordnung.....	28
3.1.3 Kostenfunktionen.....	28
3.1.4 Strategie, Näherungswerte, weitere Probleme.....	28
3.1.5 Bisherige Arbeiten für Mars 96 und Mars Express.....	29
3.2 Bildrekonstruktion.....	30

3.2.1 Der DCT-Algorithmus.....	30
3.2.2 Algorithmus zur Reduzierung der Blockartefakte.....	31
3.2.3 Anisotrope Diffusion.....	32
3.2.4 Non-Local Means.....	36
4 Bestimmung von Verknüpfungspunkten.....	39
4.1 Bestimmung des Verfahrens.....	39
4.1.1 Lokale oder globale Zuordnung.....	40
4.1.2 Flächen- oder merkmalsbasierte Zuordnung.....	40
4.1.3 Näherungswerte, Tupelbildung.....	40
4.1.4 Vorentzerrung.....	41
4.1.5 Kostenfunktion.....	42
4.2 Prozessierungskette.....	42
4.3 Zuordnungsverfahren.....	47
4.4 Bündelausgleichung.....	51
5 Datenprozessierung.....	53
5.1 Untersuchungen zur Bildrekonstruktion.....	53
5.1.1 Eigenschaften der HRSC-Bilddaten.....	53
5.1.2 Reduzierung von Blockartefakten.....	54
5.1.2.1 Evaluierung mit Testbildern.....	54
5.1.2.2 Evaluierung mit HRSC-Bildern.....	57
5.1.2.3 Anwendung auf Farbkanäle.....	59
5.1.3 Reduzierung von Bildrauschen.....	61
5.1.3.1 Evaluierung mit Testbildern.....	61
5.1.3.2 Evaluierung mit HRSC-Bildern.....	64
5.2 Prozessierung von Einzelstreifen.....	68
5.2.1 Konzept.....	68
5.2.2 Ergebnisse.....	69
5.2.3 Statistik der Standardprozessierung.....	75
5.3 Prozessierung von Blöcken.....	76
5.3.1 Konzept.....	76
5.3.2 Ergebnisse Iani Chaos-Block.....	77
5.3.3 Ergebnisse Olympus Mons-Block.....	80
6 Fazit und Ausblick.....	87
Literaturverzeichnis.....	89
Abkürzungsverzeichnis.....	107
Anhang A: Ergebnisse Blockartefakte.....	111
Anhang B: Kompressionsraten.....	117
Anhang C: Tabellen.....	121
Dank.....	129
Lebenslauf.....	131

1 Einleitung

1.1 Mars Express-Mission

Mars Express (MEX) ist die erste interplanetare Raumsonde, die von der europäischen Raumfahrtbehörde ESA (European Space Agency) vorbereitet und gestartet wurde. Am 2. Juni 2003 hob die Sojus-Trägerrakete mit Mars Express an Bord erfolgreich vom Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan ab und wurde auf Kurs Richtung Mars geschickt. Nach einer nur etwa sechsmonatigen Reise erreichte die Sonde am 25. Dezember 2003 den Planeten Mars und schwenkte in eine hochelliptische Umlaufbahn ein. Nach Kurskorrekturen wurde die planmäßige polare Umlaufbahn erreicht, so dass am 9. Januar 2004 das erste Bild der Marsoberfläche aufgenommen werden konnte. Die Mission war zunächst für die Dauer von einem Marsjahr geplant, was annähernd zwei Erdjahren entspricht. Mittlerweile wurde die Mission von der ESA zweimal verlängert, und es sollen noch bis Mai 2009 Daten geliefert werden.

Ziel der Mission ist die hochaufgelöste, stereoskopische topographische Kartierung und die Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung der gesamten Oberfläche des Planeten, die Untersuchung der Atmosphäre und ihrer Wechselwirkung mit der Oberfläche und dem Sonnenwind, und schließlich die Erforschung von Strukturen unter der Oberfläche mittels Radar. Dafür befinden sich an Bord von Mars Express insgesamt sieben wissenschaftliche Experimente, wovon im Rahmen dieser Arbeit die Bilder der HRSC (High Resolution Stereo Camera) relevant sind. Als weitere Nutzlast beförderte die Sonde das Landemodul Beagle 2, welches die mineralogische und chemische Zusammensetzung der Landestelle analysieren sollte. Auch nach Zeichen von früherem oder vielleicht sogar noch existierendem Leben sollte gesucht werden. Leider konnte nach der Abtrennung vom Mutterschiff am 19. Dezember 2003 kein Funkkontakt zu Beagle 2 hergestellt werden, so dass von einer missglückten Landung ausgegangen wird.

Bei der HRSC handelt es sich um einen Pushbroom-Scanner mit insgesamt neun Zeilensensoren, die parallel in der Fokalebene angeordnet sind. Bis zu fünf panchromatische Sensoren erlauben eine gleichzeitige Stereoabdeckung des Zielgebiets für eine robuste photogrammetrische Auswertung. Zusätzlich erfolgt simultan eine multispektrale Abtastung mit vier weiteren Zeilen im blauen, grünen, roten und nahen infraroten Farbbereich. Bei einer Flughöhe von 270 km über der Oberfläche wird im Perizentrum eine Auflösung von ca. 12 m erreicht. Als Besonderheit der HRSC ist noch ein zusätzliches Objektiv mit einem Flächen-CCD-Sensor vorhanden, mit dem panchromatische Aufnahmen mit einer Auflösung von bis zu 2,5 m möglich sind.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Digitalen Bildzuordnung vorgestellt, mit dem automatisch gleichmäßig verteilte hochgenaue Verknüpfungspunkte in HRSC-Bildern extrahiert werden. Hierbei sind die zahlreichen Besonderheiten der HRSC-Daten wie Bildgeometrie, Aufnahmegeometrie, Makropixel, Bildkompression, Bildqualität, Radiometrie und Bildinhalt zu berücksichtigen. Es soll eine automatische Prozessierungskette entwickelt werden, mit der sämtliche Bildstreifen der Mission operationell verarbeitet werden können. Ein manuelles Eingreifen soll so weit wie möglich vermieden werden, um die großen Datenmengen effizient verarbeiten zu können. Neben der Prozessierung der Einzelstreifen soll auch eine Methode entwickelt werden, die auf mehrere sich überlappende Bildstreifen, welche einen Blockverband bilden, angewandt werden kann. Als ein zusätzlicher Teilbereich der Prozessierungskette werden Verfahren zur Bildrekonstruktion untersucht, um Kompressionsartefakte und Rauschen in den HRSC-Bildern zu vermindern. Das Ziel dieser Bearbeitung ist es, das Verfahren der Digitalen Bildzuordnung zu stabilisieren und eine höhere Anzahl an Verknüpfungspunkten zu extrahieren, um eine gleichmäßigere Abdeckung in den Bildern zu erreichen. Diese Anforderung ist von der anschließenden Bündelausgleichung (Spiegel 2007) gegeben, die zur Relativen Orientierung der Zeilenkamera ausreichend viele Verknüpfungspunkte benötigt. Auch zur Absoluten Orientierung mittels einer Anpassung an ein global verfügbares DGM (Digitales GeländeModell) ist eine gleichmäßig verteilte und möglichst lückenlose Punktwolke erforderlich.

Die Verknüpfungspunkte dienen als Eingangsdaten für die Bündelausgleichung, mit der die Äußere Orientierung der Sonde bzw. der Kamera verbessert werden soll. Die 3D-Position der Sonde bezüglich eines marsfesten Koordinatensystems zu einem bestimmten Zeitpunkt ist zunächst aus der Aufnahmeplanung bekannt. Nachträglich werden diese Daten von der ESA kontinuierlich mit Hilfe von Entfernungs- und Dopplermessungen und Triangulationen verbessert. Die Lage der Kamera (also die Blickrichtung) wird gemäß der Aufnahmeplanung mit einem Sternensensor und Kreiseln eingestellt. Diese Werte stehen als Äußere Orientierung für die photogrammetrische Auswertung zur Verfügung; sie sind mit einer von der ESA angegebenen Genauigkeit von 1–2000 m für die Position (Hechler & Jáñez 2000) und 28 mgon für die Lagewinkel für eine hochgenaue Punktbestimmung allerdings nicht präzise genug. Mit einer Bündel-

ausgleichung sollen die Bahn- und Lagedaten verbessert werden, um damit die Generierung subpixelgenauer DGMS und weiterer abgeleiteter Produkte wie Orthophotos, Orthophotomosaike und Karten zu ermöglichen. Mit diesen Daten können insbesondere die Geologie und Topographie des Mars untersucht werden, um die dynamischen Prozesse in der geschichtlichen Entwicklung des Planeten zu verstehen, welche auch Rückschlüsse für Vorgänge auf der Erde erlauben.

1.3 Strukturierung der Arbeit

In Kapitel 2 werden nach einer kurzen Vorstellung des Mars die Missionen näher vorgestellt, welche aus photogrammetrischer Sicht bzw. für diese Arbeit als besonders wichtig erachtet werden. Diese sind Mariner 9, die beiden Viking-Sonden und Mars Global Surveyor. Auch auf die Mars 96-Mission wird kurz eingegangen, die zwar fehlschlug, aber in ihrer Rolle als Vorgänger von Mars Express interessant ist. Detaillierter wird auf die Mars Express-Mission mit dem Schwerpunkt HRSC eingegangen. Anschließend wird noch ein Ausblick auf weitere aktuelle und zukünftige, geplante Missionen gegeben.

In Kapitel 3 werden verschiedene Verfahren zur digitalen Bildzuordnung klassifiziert, beschrieben und erörtert. Danach werden Verfahren zur Beseitigung von Blockartefakten und zur Rauschunterdrückung vorgestellt, die in dieser Arbeit zur Rekonstruktion der HRSC-Bilder untersucht werden.

In Kapitel 4 wird zunächst herausgearbeitet, mit welchen Methoden und welcher Strategie das gestellte Problem der Bildzuordnung bestmöglich gelöst werden kann. Anschließend wird das Prinzip der einzelnen Verarbeitungsstufen von der Bildkonvertierung und Bildrekonstruktion über die Vorentzerrung bis zur eigentlichen Bildzuordnung beschrieben. Das entwickelte Verfahren zur digitalen Bildzuordnung wird hier im Detail vorgestellt. Es wird auch kurz die Bündelgleichung beschrieben, welche zur Evaluierung der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse verwendet wurde.

Nach einer Analyse der Eigenschaften der HRSC-Bilder hinsichtlich Kompressionsartefakten und Rauschen werden in Kapitel 5 Verfahren zur Bildrekonstruktion diskutiert und anhand von Testdaten evaluiert. Im Folgenden wird die entwickelte Prozessierungskette sowohl für die Einzelstreifenauswertung als auch für Blöcke konkret beschrieben. Die Ergebnisse der Massenprozessierung für Einzelstreifen werden präsentiert und diskutiert. Für die blockweise Auswertung wird ein Konzept aufgestellt, und es werden exemplarisch zwei Gebiete untersucht. Die Ergebnisse werden evaluiert und bewertet, und die Grenzen des vorgestellten Verfahrens werden aufgezeigt.

Zum Schluss der Arbeit werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Resümee wird gezogen. Es folgt ein Ausblick mit Vorschlägen für zukünftige Arbeiten.

2 Marserforschung

In diesem Kapitel wird zunächst mit dem Planeten Mars das Objekt der hier durchgeführten Forschung kurz vorgestellt. Es folgt eine Beschreibung der photogrammetrisch interessanten Marsmissionen Mariner 9, Viking und der MEX-Vorgängermission Mars 96. Auf Mars Global Surveyor wird wegen des in dieser Arbeit verwendeten MOLA-DGMs näher eingegangen. Anschließend wird die Mars Express-Mission beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf der für diese Arbeit relevanten HRSC liegt. Zum Schluss wird noch ein kurzer Überblick über weitere aktuelle aktive und geplante Marsmissionen gegeben. Ausführliche Beschreibungen zur Geschichte der Marserforschung sind in (Sheehan 1996) zu finden. Eine vollständige Liste aller Marsmissionen mit Beschreibungen findet sich z. B. in (Wikipedia 2007).

2.1 Der Planet Mars

Der Mars ist der vierte Planet in unserem Sonnensystem und ist somit der äußere Nachbar der Erde. Er gehört mit Merkur und Venus zu den erdähnlichen Planeten, da er im Gegensatz zu den Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun einen schalenförmigen festen Aufbau besitzt. Zum Zeitpunkt der Opposition, d. h. wenn Sonne, Erde und Mars in einer Linie stehen, ist er am Nachthimmel als auffallend heller rötlicher Lichtpunkt zu sehen. Daher ist er schon seit der Antike in vielen Kulturen wie Griechenland, Rom, Ägypten, Babylon, Azteken-Reich, Indien, China und in der nordischen Mythologie bekannt. Aufgrund seiner bedrohlichen roten Färbung, die auf Eisenoxid-Staub („Rost“) zurückzuführen ist (s. Abb. 1), wurde er meist als Gott des Krieges verehrt und wurde im antiken Rom Mars genannt. Er ist mit dem griechischen Ares gleichzusetzen und wird mit ♂ symbolisiert, das auch als Zeichen für Männlichkeit steht. Nach ihm wurde der Monat März benannt, der deutsche Dienstag (lat. dies martis = „Tag des Mars“) geht auf ihn zurück, der Name Marcus bedeutet „dem Mars geweiht“.

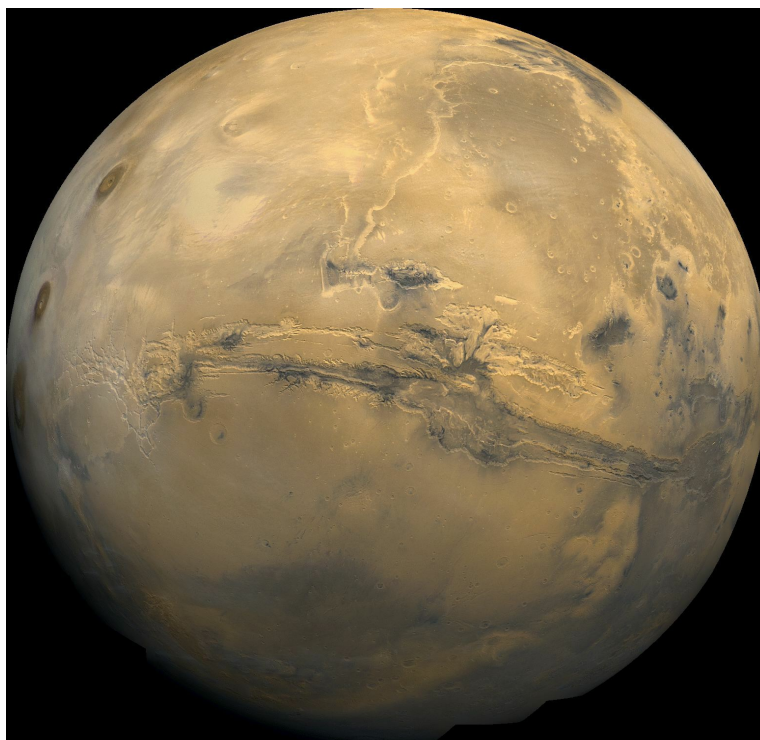


Abb. 1: Mosaik aus Viking 1-Bildern mit Blick auf Valles Marineris, Quelle: NASA/JPL-Caltech

Die Umlaufzeit des Mars um die Sonne beträgt 687 Tage, was in etwa zwei Erdjahren entspricht. Ein Marstag dauert 24h 39min und wird Sol genannt. Die Rotationsachse ist $25^{\circ} 12'$ gegen die Bahnebene geneigt, wodurch Jahreszeiten entstehen. Sein Durchmesser mit durchschnittlich 6794km ist im Vergleich zur Erde nur etwa halb so groß. Er hat eine Masse von ca. einem Zehntel der Erde; die Schwerkraft an der Oberfläche liegt bei einem Drittel des Erdwertes. Neben einem schwachen Magnetfeld ist auch eine dünne Atmosphäre vorhanden, die zu 95% aus Kohlendioxid besteht. Sie kann nur wenig Wärme speichern, weshalb die Temperaturunterschiede zwischen Tag (20°C) und Nacht (-85°C) recht groß sind. Dennoch lassen sich Zirruswolken und Windhosen („Dust Devils“) (Stanzel et al. 2006) beobachten; Staubstürme können große Teile der Oberfläche verhüllen und die Beobachtung mit Raumsonden behindern. Weiterhin ist zu erwähnen, dass 1877 vom amerikanischen Astronomen Asaph Hall zwei Monde entdeckt wurden (Hall 1878), die

nach den Söhnen des Ares als Phobos („Angst“) und Deimos („Schrecken“) benannt sind. Es handelt sich bei den beiden kleinen unregelmäßig geformten Gesteinsbrocken wahrscheinlich um von der Gravitation des Mars eingefangene Asteroiden. Bemerkenswerterweise wurden bereits 1726 durch Jonathan Swift in Gullivers Reisen (Swift 1726) rein fiktiv zwei Marsbegleiter erwähnt, deren Eigenschaften sehr nahe den tatsächlichen Messwerten liegen.

Für die moderne Wissenschaft ist der Mars aufgrund seiner Erdähnlichkeit ein interessantes Forschungsobjekt. Es wird vermutet, dass es in der Frühzeit des Mars vor ca. drei Milliarden Jahren auf der Oberfläche Wasser gegeben hat und dass eine dichte Atmosphäre vorhanden war. Das Verständnis seiner Entwicklungsgeschichte lässt auch Vorgänge auf der Erde besser verstehen.

2.2 Photogrammetrisch bedeutsame Missionen

In diesem Abschnitt werden die Missionen vorgestellt, mit denen größere Mengen an Bildmaterial vom Mars gewonnen wurden. Mit Mariner 9 war erstmals eine globale Abdeckung des Planeten möglich. Die Bilder der Viking-Mission sind auch heute noch Grundlage für Standardkartenwerke und geodätische Kontrollnetze. Die Mars 96-Mission ist zwar gescheitert, sie ist als Vorgängermission von Mars Express hier dennoch von Interesse. Das vom MOLA-Instrument der Mars Global Surveyor-Mission gewonnene DGM ist eine wichtige Grundlage der Marsforschung und wird auch in dieser Arbeit verwendet. Eine systematische photogrammetrische Auswertung war allerdings nur mit Mars 96 geplant.

2.2.1 Mariner 9

Nach den erfolgreichen Vorbeiflügen von Mariner 4 (1964), 6 und 7 (1969) sollten im Startfenster Mai 1971 zwei weitere Sonden aus dem Mariner-Programm der USA starten und in eine Umlaufbahn um den Mars einschwenken. Die Aufgaben der beiden Sonden waren komplementär: Mariner 8 sollte innerhalb von 90 Tagen 70% der Marsoberfläche mit einer Weitwinkelkamera kartieren, während Mariner 9 zeitliche Veränderungen in der Marsatmosphäre und -oberfläche studieren sollte. Leider schlug der Start von Mariner 8 fehl, so dass das wissenschaftliche Programm für Mariner 9 abgeändert wurde, um auch die Aufgaben der verlorenen Sonde zu übernehmen. Am 14. November 1971 erreichte Mariner 9 den Mars und schwenkte als erste Raumsonde überhaupt erfolgreich in eine Umlaufbahn um einen Planeten ein. Die Mission lieferte insgesamt 7329 Bilder mit der kompletten Abdeckung des Planeten. Es konnte ein globales Mosaik von 1 km Auflösung erstellt werden, für etwa 5% der Oberfläche wurde eine Auflösung von 100 m erzielt. Durch eine fortschrittlichere Kamertechnik konnte eine deutlich bessere Bildqualität gegenüber den vorherigen Missionen erreicht werden (s. Abb. 2).

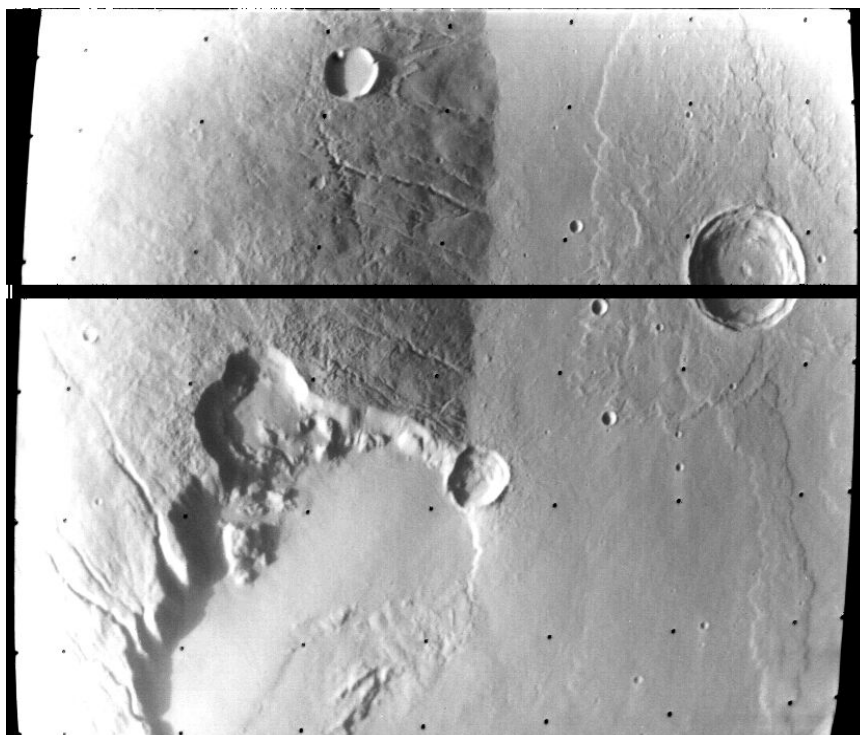


Abb. 2: Die Flanke von Hecates Tholus, aufgenommen von Mariner 9, Quelle: NASA/JPL-Caltech

Bei der Mission wurden keine photogrammetrischen Aspekte berücksichtigt, dennoch konnten stereoskopische Auswertungen mit analytischen Plottern durchgeführt werden (Levinthal et al. 1973). Da zwischen den einzelnen Aufnahmen der Stereopaare einige Zeit liegen kann, sind die Unterschiede in Maßstab, Geometrie und Beleuchtungsrichtung u.U. gravierend. Die Messungen gestalteten sich dadurch recht schwierig, es konnte aber ein erstes Kontrollnetz erstellt werden (Davies & Arthur 1973, Davies 1973). Weitere wissenschaftliche Ergebnisse der Mission sind in (Steinbacher et al. 1972), (Steinbacher & Haynes 1973) und (Hartmann & Raper 1974) zu lesen.

2.2.2 Viking

Das bis dahin ambitionierteste Projekt der Planetenforschung war die Viking-Mission von 1975, welche damals fast 1 Milliarde Dollar gekostet hat. Die zwei baugleichen Raumsonden Viking 1 und Viking 2 bestanden jeweils aus einem Landemodul und einem Orbiter, die insgesamt 13 Experimente zu verschiedenen Themengebieten durchführen sollten. Das Hauptziel der Mission war eine sichere Landung auf dem Mars, um dort die Landemodule nach Spuren von Leben und Wasser suchen zu lassen. Die Orbiter dienten der Kommunikation zwischen Landeeinheit und Erde und der Kartierung des Planeten. Das VIS (Visual Imaging Subsystem) an Bord der Orbiter bestand aus jeweils zwei neuentwickelten Vidicon-Kameras, die durch leicht verschiedene Blickrichtungen von $1,38^\circ$ Unterschied am Rand der Bilder überlappende Bildstreifen erzeugten (s. Abb. 3). Die Kameras mit Cassegrain-Objektiven (Riekher 1990) besaßen eine Brennweite von 475 mm. Die photoempfindliche Schicht wurde mit 1182×1056 Pixeln bei 7 Bit Auflösung abgetastet. Aus einer Orbithöhe von 1500 km wurde ein Gebiet von ca. 40×44 km abgedeckt, wobei eine Bodenauflösung von 40 m erzielt wurde. Mit einem Filterrad konnten Aufnahmen in sechs verschiedenen Wellenbereichen gemacht werden.



Abb. 3: Aufnahmeprinzip bei Viking, Quelle: NASA/JPL-Caltech

Am 20.08.1975 wurde Viking 1 von Cape Canaveral gestartet, und nur wenige Tage später am 09.09.1975 folgte Viking 2. Die Sonden erreichten den Mars knapp 1 Jahr später am 19.06.1976 und 07.08.1976. Die aus Mariner 9-Aufnahmen

ausgesuchten Landstellen erwiesen sich allerdings aufgrund zu hoher Oberflächenrauigkeit als ungeeignet, so dass nach neuen Gebieten gesucht wurde. Mit geringer Verzögerung landeten dann Viking 1 am 20. Juli 1976 in Chryse Planitia (22,48° N, 49,97° W) und Viking 2 am 3. September 1976 in Utopia Planitia (47,97° N, 225,74° W). Die Lander nahmen viele Bilder von ihrer Umgebung auf und sammelten wertvolle Daten zu Meteorologie und Atmosphäre. Die Untersuchung der Bodenproben konnte allerdings keinen eindeutigen Nachweis von organischem Leben erbringen, die Ergebnisse der Versuche werden heute mit chemischen Reaktionen erklärt (Klein et al. 1976, Levin & Straat 1976, 1977).

Der Viking 2-Orbiter wurde nach 706 Marsumrundungen am 25. Juli 1978 abgeschaltet, Viking 1 lieferte noch bis zum 17. August 1980 nach 1485 Umrundungen Daten. Insgesamt haben die beiden Sonden zusammen etwa 50000 Bilder vom Mars aufgenommen, wobei eine Abdeckung von 97% bei einer Auflösung von 300 m oder besser erreicht wurde. Es sind zwar ca. 4000 Stereobildpaare aus benachbarten Orbits vorhanden, doch aufgrund des geringen Konvergenzwinkels beträgt die Höhengenaugigkeit nur einige Kilometer (Blasius et al. 1982, Kirk et al. 1999). Die Daten der Viking- und der Mariner 9-Mission dienen noch heute als Grundlage für das aktuelle Kontrollnetz auf dem Mars. Seit 1977 wurden von Merton E. Davies verschiedene Versionen des sogenannten RAND-Netzes berechnet (Davies 1978, Davies et al. 1978, Davies & Katayama 1983, Davies 1990, Davies 1993), wobei allerdings die Objektpunkte auf die Oberfläche einer Kugel bzw. eines Ellipsoids gezwungen wurden. Dies bedeutet, dass nur 2D-Koordinaten und keine Höheninformationen für diese Punkte vorliegen. Die Genauigkeit dieser Netze reichte von anfangs 10–20 km bis schließlich 1–6 km.

Seit 1984 wurde beim USGS (United States Geological Survey) in Flagstaff von Sherman S. C. Wu ein Passpunktnetz mit dreidimensionalen Koordinaten gerechnet, welches ausschließlich auf Viking-Bildern basiert (Wu & Schafer 1984, Wu & Doyle 1990). Es wurde eine Genauigkeit von ca. 5 km in der Lage und 750 m in der Höhe erzielt. Das aktuelle RAND/USGS-Kontrollnetz verwendet zur Genauigkeitssteigerung 1232 in MOLA-Daten (Mars Orbiter Laser Altimeter, s. 2.2.3.4) gemessene Passpunkte (Archinal et al. 2004). Es bezieht sich auf das momentane IAU/IAG 2000 Mars-Koordinatensystem (Duxbury et al. 2002, Seidelmann et al. 2002), und die Genauigkeit wird mit ca. 250 m in der Lage und 10 m in der Höhe angegeben. Auf Grundlage dieses Kontrollnetzwerkes, annähernd 4600 Viking-Bildern und dem MOLA-DGM wurde ein globales Mosaik im Maßstab 1:5 000 000 namens MDIM (Mars Digital Image Model) gerechnet. Die aktuelle Version 2.1 hat eine Auflösung von 256 Pixel/Grad, was ca. 231 m am Äquator entspricht bei einer Genauigkeit von ca. 1 Pixel (≈ 200 m) (Kirk et al. 2001). Es existiert noch eine weitere Variante, bei der das Viking-Netz in einer simultanen 3D-Bündelblockausgleichung mit aktuellen Daten des Schwerefelds und der Bahnparameter und mit Mars Pathfinder (Golombek et al. 1997) als neuen Passpunkt berechnet wurde (Zeitler 1999).

Die Ergebnisse aller 13 Viking-Experimente sind in einem umfassenden Report auf über 700 Seiten in wissenschaftlichen Artikeln im 1977 erschienenen Sonderheft „Scientific Results of the Viking Project“, J. Geophys. Res., (82) 28, 3951–4684 nachzulesen. Hervorzuheben sind in diesem Heft die beiden Übersichtsartikel „The Viking Project“ (Soffen 1977) und „The Missions of the Viking Orbiters“ (Snyder 1977). Zwei Jahre später erschien ein weiteres Sonderheft (J. Geophys. Res., (84) B14, 7906–8544) zur Extended Mission mit den Schwerpunkten Tektonik und Geophysik, Geologie und Topographie, Meteorologie sowie Thermik und Atmosphäre. Neben dem Einführungsartikel (Snyder 1979a) ist vor allem der noch heute relevante letzte Artikel (Snyder 1979b) mit einer Zusammenfassung des kompletten Wissens über den Planeten Mars empfehlenswert. Eine Sammlung von Artikeln, die sich speziell mit der Atmosphäre, Meteorologie und Staub beschäftigen, ist in J. Geophys. Res., (84) B6, 2793–3096 (1979) mit dem Einleitungsartikel von Hugh H. Kieffer (Kieffer 1979) zu finden.

2.2.3 Mars Global Surveyor (MGS)

2.2.3.1 Missionsüberblick

Die amerikanische Sonde Mars Observer (MO) (Albee et al. 1992) ging im August 1993 kurz vor dem Einschwenken in den Marsorbit verloren, da kein Funkkontakt mehr hergestellt werden konnte. Am 7. November 1996 wurde mit Mars Global Surveyor eine Ersatzmission erfolgreich gestartet, die den Mars nach zehnmonatiger Reise am 11. September 1997 erreichte. Aus Budgetgründen musste die Mission allerdings sehr kostengünstig realisiert werden; es konnten dazu die Ersatzgeräte von der Mars Observer-Mission verwendet werden. Zur weiteren Kostenreduktion wurde als Startvehikel keine Titan III-Rakete sondern eine Delta II verwendet, wodurch jedoch auch deutlich an Gewicht eingespart werden musste. Hierfür wurden mit dem GRS (Gamma Ray Spectrometer) (Boynton et al. 1992) und dem PMIRR (Pressure Modulated Infrared Radiometer) (McCleese et al. 1992) die zwei schwersten Instrumente von MO nicht mit an Bord genommen. Weiterhin wurde nur Treibstoff zum Einschwenken in die Marsumlaufbahn mitgeführt, das Absenken der hochelliptischen Bahn in den endgültigen kreisförmigen Orbit sollte mit einer neuen Technik namens Aerobraking erreicht werden. Dabei wird die Bahn der Sonde durch die oberen Schichten der Marsatmosphäre geführt.

Wenn die Solarmodule entsprechend eines maximalen Widerstands ausgerichtet werden, wird die Sonde durch die Reibung langsam abgebremst. Nach fünf Monaten sollte mit dieser Methode der endgültige Orbit erreicht werden. Aufgrund eines Problems mit einem Solarpanel ergaben sich unvorhergesehene Bewegungen, die die Sonde gefährdeten. Man entschloss sich zu einem sanfteren Aerobraking-Manöver, wodurch der endgültige Orbit erst im Mai 1999 erreicht wurde. Bei diesem handelt es sich um einen nahezu kreisförmigen Orbit mit einer durchschnittlichen Flughöhe von 378 km bei einer Umlaufzeit von nur zwei Stunden. Mit dieser sonnensynchronen Bahn konnte eine komplette Abdeckung des Mars alle 26 Tage erreicht werden. Die Mission verlief sehr erfolgreich: Es wurden über 240 000 Bilder der Marsoberfläche aufgenommen, bis am 2. November 2006 kein Kontakt zur Sonde mehr hergestellt werden konnte. Eine Suche mit Hilfe des Mars Reconnaissance Orbiters (MRO) (Zurek & Smrekar 2007) und Mars Express (s. 2.3) blieb leider erfolglos. Auch die beiden Mars Rover Spirit und Opportunity (Crisp et al. 2003) konnten keinen Kontakt herstellen, so dass die Sonde danach vom JPL (Jet Propulsion Laboratory) als verloren erklärt wurde. Weitere allgemeine Informationen zu dieser Mission sind in (Albee et al. 1998, 2001) beschrieben.

2.2.3.2 Instrumente

An Bord der Sonde befanden sich insgesamt fünf Instrumente, um die Zielsetzungen der Mission zu erreichen: Aufnahme hochaufgelöster Bilder der Oberfläche, Erforschung von Topographie und Schwerefeld, Untersuchung der Rolle von Wasser und Staub an der Oberfläche und in der Atmosphäre, sowie Erforschung des Wetters, Klimas und des Magnetfeldes. Es folgt eine Aufzählung der Instrumente mit einer kurzen Beschreibung und Literaturhinweisen. Auf die Kamera (MOC) und das Laseraltimeter (MOLA) wird in den Abschnitten 2.2.3.3 bzw. 2.2.3.4 noch detaillierter eingegangen.

Mars Orbiter Camera (MOC): Dieses Kamerasystem, bestehend aus zwei Weitwinkelkameras und einer Schmalwinkelkamera, hat die Aufgabe, die Oberfläche und Atmosphäre des Mars für Meteorologie, Klimatologie und Geologie zu beobachten. Mit den Weitwinkelkameras werden globale synoptische Bilder vom täglichen Marswetter aufgenommen, um das Wettergeschehen und seine Änderungen über einen Zeitraum von Stunden bis Jahren zu verstehen. Mit den hochaufgelösten Bildern der Schmalwinkelkamera werden vor allem die Interaktion der Atmosphäre mit der Oberfläche und geologische Prozesse beobachtet. Informationen zu diesem Instrument und Ergebnisse sind in (Malin et al. 1992, 1998, 2001) bzw. in Abschnitt 2.2.3.3 zu finden.

Thermal Emission Spectrometer (TES): Dieses Instrument misst nach dem Prinzip des Michelson-Interferometers die infrarote thermische Strahlung der Atmosphäre und der Oberfläche, um die Komposition der Felsen und des Bodens, der Polkappen, des atmosphärischen Staubs und der Wolken zu studieren. Eine Beschreibung des Instruments und die Ergebnisse des Experiments sind in (Christensen et al. 1998, 2001) zu finden.

Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA): Durch Laufzeitmessung eines von der Oberfläche reflektierten Laserstrahls kann die exakte Höhe über der Oberfläche bestimmt werden. Mit der Zeit kann aus den vielen Einzelmessungen die globale Topographie des Mars bestimmt werden, womit insbesondere die Geologie des Planeten studiert werden kann. Die Daten dienen aber auch zur Volumenbestimmung der Polkappen und dessen Änderung und der Messung von Wolkenhöhen. Im Zusammenhang mit Schweredaten können Rückschlüsse auf die innere Struktur des Planeten gewonnen werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und eine Beschreibung des Instruments ist in (Smith et al. 1999a, 2001b) gegeben. In 2.2.3.4 wird dieses Instrument aufgrund seiner Relevanz für die Untersuchungen dieser Arbeit noch näher vorgestellt.

Radio Science Investigations (RS): Durch Dopplermessungen des von der Sonde ausgesandten Funksignals können Massenanomalien und somit das Schwerefeld des Planeten bestimmt werden. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, das von der hinter dem Mars auftauchenden Sonde durch die Atmosphäre gesandte Signal zu messen. Mit dieser Methode können sowohl der Druck als auch die Temperatur der Atmosphäre bestimmt werden. Aufgrund der polaren Bahn von MGS war dies allerdings nur in den Polgebieten möglich. Da jede Raumsonde über eine Funkverbindung zur Erde verfügt, kann dieses Experiment mit jedem Orbiter durchgeführt werden. Informationen zu diesem Experiment befinden sich in (Tyler et al. 1992, 2001), (Hinson et al. 1999) und (Smith et al. 1999b).

Magnetometer/Electron Reflectometer (MAG/ER): Das Magnetometer kann die Stärke und Richtung des Magnetfeldes des Mars bestimmen, und das Elektronenreflektometer misst den Restmagnetismus in der Kruste. Ergebnisse und eine Beschreibung des Instruments befinden sich in (Acuna et al. 1998, 2001) und (Mitchell et al. 2001).

Neben diesen Instrumenten befindet sich noch ein Beschleunigungssensor (Keating et al. 1998) an Bord, der anhand einer Testmasse die Geschwindigkeitsänderungen während der Aerobraking-Phase misst. Damit können Rückschlüsse auf die Dichte der Atmosphäre gezogen werden. Zur Kommunikation zwischen Erde oder anderen Orbitern und Landemodulen ist noch eine Helix-Antenne (Mars Relay Communications Experiment) mit an Bord.

2.2.3.3 Mars Orbiter Camera (MOC)

Das MOC-System besteht aus zwei Weitwinkelkameras (WA: Wide Angle) und einer Schmalwinkelkamera (NA: Narrow Angle). Alle drei Kameras besitzen jeweils eine CCD-Zeile, die nach dem Pushbroom-Prinzip Bildstreifen aufnehmen. Die Elektronik an Bord der Sonde ist so ausgelegt, dass alle Kameras gleichzeitig betrieben werden können. Um die Datenmengen zur Erde senden zu können, werden die Bilder mit einer verlustfreien oder wahlweise verlustbehafteten Methode komprimiert.

Die WA-Kameras unterscheiden sich durch den beobachteten Spektralbereich, wobei eine im blauen Bereich (400–450 nm) und die andere im roten Bereich (580–620 nm) arbeitet. Beide besitzen eine CCD-Zeile aus 3456 Pixeln mit einer Pixelgröße von 7 μm und eine Brennweite von 11 mm. Bei einem Blickwinkel von 140° ergibt sich eine Bodenauflösung von bis zu 230 m/Pixel. Diese beiden Kameras waren dazu gedacht, durch tägliche Übersichtsbilder das Wetter des Mars zu beobachten. Während der sogenannten „Geodesy Campaign“ (Caplinger & Malin 2001) im Mai und Juni 1999 wurde mit diesen Kameras die gesamte Marsoberfläche zwischen 70° S und 90° N aufgenommen. Aus diesen Daten wurde ein Mosaik gebildet, welches mit dem MDIM vergleichbar ist. Über 90% dieses Gebiets konnte durch seitwärtsblickende Aufnahmen aus benachbarten Orbits stereoskopisch aufgenommen werden. Erste Experimente haben gezeigt, dass aus diesen Daten DGMs mit einer horizontale Auflösung von 500–1000 m und einer Höhengenaugigkeit von 100–400 m erstellt werden können. Da das ebenfalls an Bord befindliche MOLA-Instrument eine wesentlich bessere Höhengenaugigkeit lieferte, wurde auf eine systematische DGM-Prozessierung der WA-Bilder verzichtet. Dennoch wird in (Caplinger & Malin 2001) darauf hingewiesen, dass dieser Datensatz dazu geeignet wäre, die teilweise großen Lücken von bis zu 8 km im MOLA-Datensatz zu schließen.

Die Schmalwinkelkamera trägt 2048 Pixel auf der CCD-Zeile mit einer Pixelgröße von 13 μm . Bei einer Brennweite von 3,5 m und einem Öffnungswinkel von 0,4° konnte am Boden eine Auflösung von bis zu 1,4 m bei einer Streifenbreite von 2,8 km erreicht werden. Im Verlauf der Mission wurde die cPROTO (compensated Pitch and Roll Targeted Observation) Aufnahmetechnik entwickelt (Malin & Edgett 2005), die eine Auflösung von bis zu 50 cm entlang des Bildstreifens erlaubt. Hierbei wird der Nickwinkel der Sonde langsamer als nötig nachgeführt, wodurch die Relativgeschwindigkeit des Sensors über der Oberfläche niedriger als sonst ist. Die Auflösung quer zur Flugrichtung kann mit dieser Methode nicht gesteigert werden. Die Detailaufnahmen der NA dienen hauptsächlich der Analyse von geologischen und atmosphärischen Prozessen. Obwohl wegen der geringen Bildgröße nur ein kleiner Teil der Marsoberfläche von etwa 3% hochaufgelöst aufgenommen werden konnte, sind Stereopaare gefunden worden, mit denen eine photogrammetrische Auswertung möglich ist (Caplinger 2003, Kirk et al. 2003, Shan et al. 2005, Yoon & Shan 2005).

2.2.3.4 Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)

Beim MOLA-Experiment (s. Abb. 4) handelt es sich um ein Laseraltimeter, mit dem hauptsächlich die globale Topographie des Mars bestimmt werden soll (Zuber et al. 1992). Außerdem können Untersuchungen über Oberflächenrauigkeit (Kreslavsky & Head 2000), Reflexionsvermögen der Oberfläche (Aharonson et al. 2001), Polkappenveränderungen (Smith et al. 2001a) und Wolkendetektion (Neumann et al. 2003) durchgeführt werden. In der Zeit von Februar 1999 bis zum Ausfall des Oszillators am 30.06.2001 wurden über 640 Millionen Einzelmessungen durchgeführt, mit denen die komplette Marsoberfläche im Bereich $\pm 88^\circ$ Breite abgedeckt wurde. Durch seitwärts blickende Beobachtungen konnten auch die Pole erfasst werden.



Abb. 4: Mars Orbiter Laser Altimeter, Quelle: NASA/GSFC Laser Remote Sensing Branch

MOLA besteht im Wesentlichen aus einem Laser mit 1064nm Wellenlänge als Sendeeinheit, einer 50cm Parabolantenne als Empfangseinheit und einem elektronischen Zähler (TIU: Time Interval Unit). Zur Messung der Höhe der Sonde über der Marsoberfläche wird ein Laserimpuls ausgesandt, der von der Oberfläche reflektiert und mit der Antenne empfangen wird. Eine Laufzeitmessung ergibt dabei direkt die Höhe R_m über der Oberfläche:

$$R_m = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

Hierbei gibt c die Lichtgeschwindigkeit und Δt die gemessene Zeit an. Um die Geländehöhe über dem Referenzsystem h_s zu berechnen, wird folgende Formel verwendet (Abshire 2000):

$$h_s = \sqrt{R_{MGS}^2 + R_m^2 - 2R_m R_{MGS} \cos \varphi} - R_{ref}, \quad (2)$$

wobei R_{MGS} der Radius des MGS-Orbits, φ der Winkel bezüglich Nadir und R_{ref} der Radius der Referenzkugel (hier 3396km) ist. Dieser geometrische Zusammenhang wird auch in Abb. 5 dargestellt. Weitere Details zum Aufbau der Elektronik, Kalibrierung und Messtechnik sind in (Afzal 1994) und (Abshire et al. 2000) beschrieben.

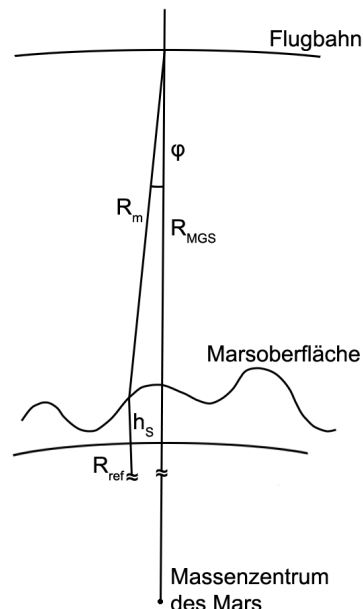


Abb. 5: MOLA-Geometrie zur Bestimmung der Geländehöhe, nachgezeichnet nach (Abshire 2000)

Bei der Messung wird mit einer Frequenz von 10 Hz ein Laserimpuls zur Oberfläche gesandt, wodurch sich alle 300 m ein beleuchtetes Gebiet (Footprint) von 168 m Durchmesser ergibt. Man erhält also einen durchschnittlichen Höhenwert innerhalb des Footprints, der praktisch nur im ebenen Gelände einen korrekten Wert darstellt. Aus diesen Rohdaten (AEDR: Aggregated Experiment Data Record) ergibt sich nach einer ersten Prozessierung ein Höhenprofil entlang der Spur auf der Oberfläche. Dieser Datensatz wird PEDR (Precision Experiment Data Record) genannt, dessen absolute Genauigkeit hauptsächlich von den Bahnparametern des MGS-Orbiters (Lemoine et al. 1999) abhängt. Durch Analyse von sich kreuzenden Spuren, an deren Schnittpunkten theoretisch die gleiche Höhe vorliegen muss, können die Bahndaten verbessert und auch grob fehlerhafte Spuren entfernt werden (Neumann et al. 2001). Dadurch ergibt sich eine durchschnittliche Genauigkeit von 10 m in der Höhe und 200 m in der Lage. Aus den MOLA-Spuren wurden im Verlauf der Mission immer wieder regelmäßige Gitterpunkte namens MEGDR (MOLA Experiment Gridded Data Record) zu einem DGM interpoliert. Das aktuelle DGM besitzt eine Auflösung von bis zu 128 Gitterpunkten pro Grad, was einer Auflösung von 463 m am Äquator entspricht. Es ist allerdings zu bedenken, dass zwischen einzelnen MOLA-Spuren am Äquator interpolierte Lücken von bis zu 8 km vorhanden sein können. Dieser Datensatz weist wegen der guten Bahndaten und Fehlerbereinigungen eine sehr hohe globale Genauigkeit auf. Es ist das bislang genaueste globale DGM vom Mars (s. Abb. 6) und wird u. a. im Rahmen dieser Arbeit zur Vorentzerrung der Bilder verwendet.

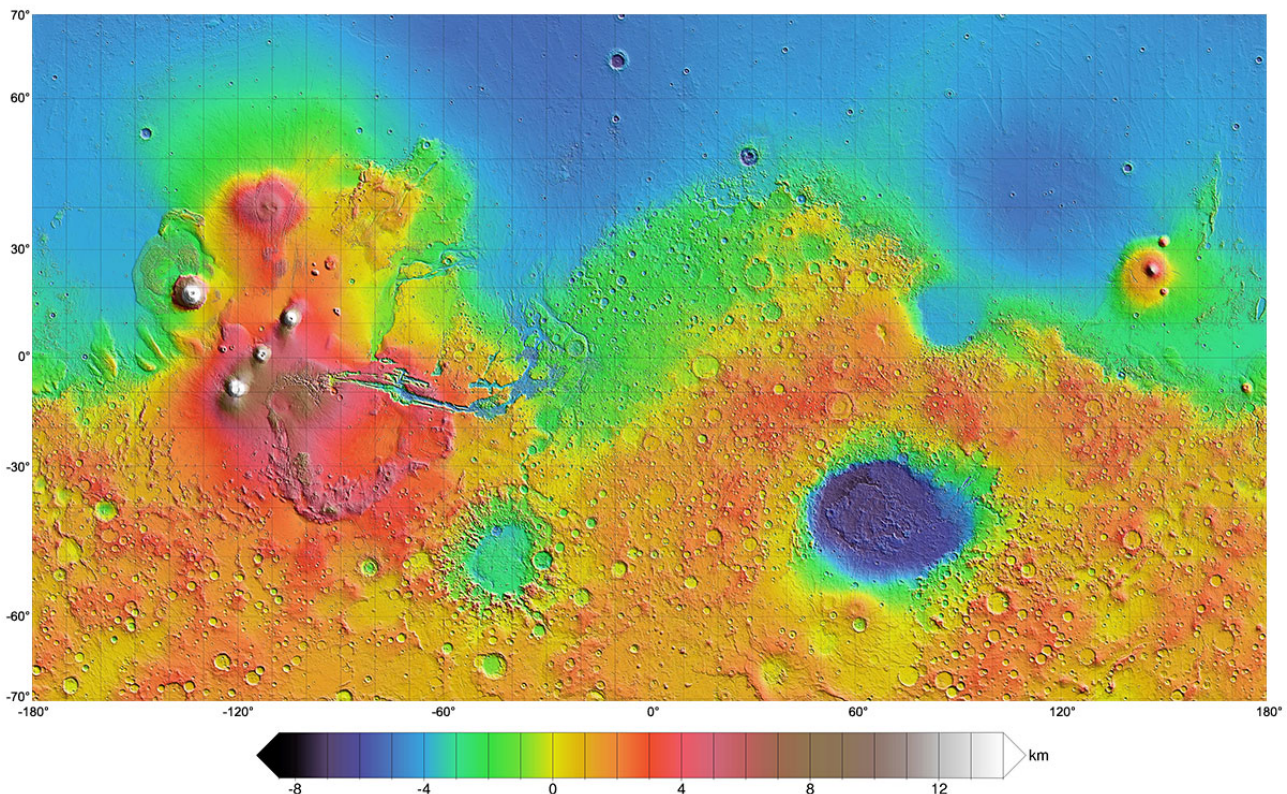


Abb. 6: Globales DGM aus MOLA-Daten (MEGDR), Quelle: MOLA Science Team

2.2.4 Mars 96

Nach der sehr erfolgreichen Viking-Mission wurde über 15 Jahre lang keine Sonde zum Mars geschickt. Nur im Jahr 1988 gab es die beiden Sonden Fobos 1+2 (Sagdeev 1988), die allerdings beide scheiterten. Für die 90er Jahre wurde von der damaligen Sowjetunion das ehrgeizige „Mars 2000“ Projekt geplant, das mehrere Orbiter, zwei Landesonden, einen Marsrover und sogar eine Sample Return-Mission beinhaltete, die Marsgestein zur Erde bringen sollte (Galeev 1996). Nach dem Ende der Sowjetunion im Dezember 1991 standen keine finanziellen Mittel mehr zur Verfügung, und das Programm wurde eingestellt. Mit Finanzierung der ESA konnte dennoch eine Mission von den sechs geplanten realisiert werden. Die ursprünglich für 1994 vorgesehene Mission wurde wegen Verzögerungen erst am 16. November 1996 als Mars 96 vom Weltraumbahnhof Baikonur gestartet. Nach erfolgreichem Start versagte die zweite Zündung der vierten Stufe der Proton-Rakete, die die Sonde aus dem Erdborbit heraus auf den interplanetaren Kurs bringen sollte. Die Abtrennung der Sonde von der fehlgeschlagenen Oberstufe erfolgte trotzdem, und die Zündung ihres eigenen Triebwerks, die für eine letzte kleine Kurskorrektur geplant war, beschleunigte sie in die Erdatmosphäre. Dort verglühte sie und stürzte in einem etwa 320×80 km großen Gebiet im Bereich des pazifischen Ozeans, Chiles und Boliviens ab.

Trotz des Misserfolgs ist diese Mission hier von Bedeutung, da die Ersatzmodelle einiger Instrumente für Mars Express verwendet werden konnten. Mars 96 war mit einem Startgewicht von über 6t die bis dahin größte Raumsonde. Sie bestand neben dem Orbiter aus zwei kleinen Landemodulen und zwei Penetratoren, die sich mit einer ungebremsten Landung in den Marsboden bohren sollten. Ziel der Mission war die topographische und mineralogische Kartierung des Mars, die Untersuchung der Atmosphäre, des Plasmas* und der inneren Struktur des Planeten. An Bord des Orbiters standen für die Erforschung von Oberfläche und Atmosphäre insgesamt zwölf, für die Plasmaforschung sieben und für astrophysikalische Untersuchungen nochmals fünf Instrumente zur Verfügung. Die Größe der Sonde mit dieser Vielzahl an Instrumenten wird in Abb. 7 deutlich.

* Die Mischung aus Ionen und Elektronen in der oberen Atmosphäre wird Plasma genannt und hat unter Einfluss elektrischer und magnetischer Kräfte besondere Eigenschaften.

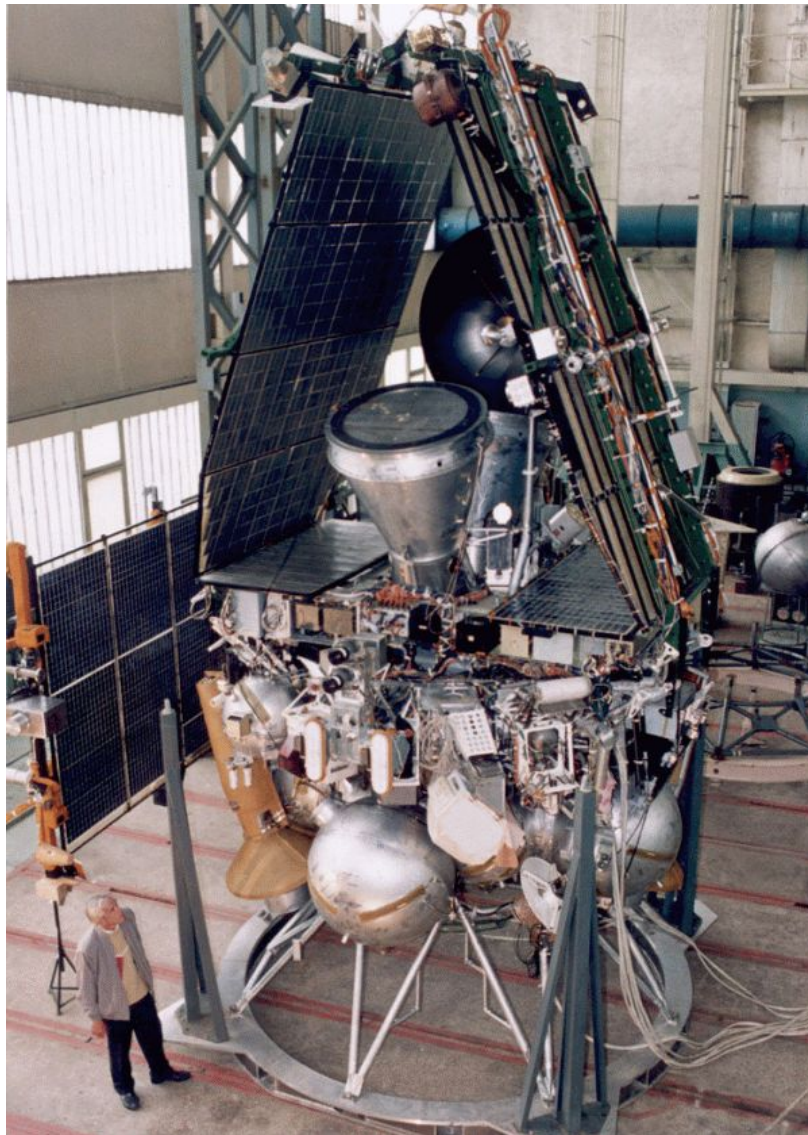


Abb. 7: Mars 96

Aus photogrammetrischer Sicht ist die ARGUS-Plattform interessant, auf der neben dem abbildenden Spektrometer OMEGA auch die beiden deutschen Kameras HRSC und WAOSS (Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner) montiert waren. Diese Plattform diente der Nadirausrichtung und Stabilisierung der optischen Instrumente und war mit einem eigenen Multiprozessorsystem, Navigationskamera, Massenspeicher, thermischen Kontrollsystem und Kalibrationssystem ausgestattet. Sowohl die HRSC als auch die WAOSS arbeiten nach dem Dreizeilenkamera-Prinzip (Hofmann 1982). Die WAOSS wurde 1988 am IKF (Institut für Kosmosforschung) in Berlin-Adlershof konzipiert und später am Institut für Weltraumsensorik des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) entwickelt. Sie ist mit einem Objektiv von 21,7 mm Brennweite und drei CCD-Zeilen mit je 5184 Pixeln unter einem Konvergenzwinkel von $\pm 25^\circ$ ausgestattet. Die Pixelgröße beträgt $7 \mu\text{m}$ und liefert eine radiometrische Auflösung von 8 Bit. Mit einem Schwadwinkel von 80° und einer Auflösung von 80 m im Perizentrum sollte diese Weitwinkelkamera den Mars global im Maßstab 1:500 000 kartieren, regionale DGMS ableiten und zeitliche Veränderungen der Oberfläche und Atmosphäre beobachten (Albertz et al. 1993, 1996). Im Gegensatz dazu sollte die HRSC ausgewählte Gebiete mit einer Auflösung von bis zu 10 m in der Periapsis aufnehmen. Die HRSC ist eines der Instrumente, die auf Mars Express wiederverwendet wurden. Ein „Flight Spare Model“ der WAOSS wird in einer leicht modifizierten Version als VIS/NIR-Sensor zur Detektion von Waldbränden auf dem Kleinsatelliten BIRD (Zhukov et al. 2006) des DLR eingesetzt. Aus einer anderen Weiterentwicklung ist die WAAC (Wide Angle Airborne Camera) für den Flugzeugeinsatz entstanden (Sandau & Eckardt 1996). Detaillierte Informationen zur WAOSS sind in (Sandau & Landrock 1988) zu finden.

2.3 Mars Express

2.3.1 Missionsüberblick

Mars Express wurde am 2. Juni 2003 um 17:45 UT vom Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan mit einer Sojus-FG Fregat-Rakete als erste europäische Mission zu einem Planeten erfolgreich gestartet. Die Sonde wurde innerhalb von nur fünf Jahren kostengünstig geplant, gebaut und gestartet, worauf der Name „Express“ hindeuten soll (vgl. Venus Express, Svedhem et al. 2007). Kommandiert wird die Raumsonde vom ESOC (European Space Operations Centre) in Darmstadt. Das Startfenster 2003 war besonders vorteilhaft aufgrund der sehr geringen Entfernung zwischen Erde und Mars (s. Abb. 8), weshalb MEX nach nur 205 Tagen am 25. Dezember den Mars erreichte. Fünf Tage zuvor wurde das kleine Landemodul Beagle 2 vom Mutterschiff Richtung Landezone gestoßen, da es über keinen eigenen Antrieb verfügt. Es konnte leider niemals Kontakt zu Beagle 2 hergestellt werden, so dass davon ausgegangen wird, dass die Landung missglückt ist (Sims 2004). Nachdem man die Unglücksstelle in MOC-NA-Bildern gefunden zu haben glaubte, wurde dies mit einem noch höher aufgelösten HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) (McEwen et al. 2007) Bild des MRO (Mars Reconnaissance Orbiter, s. 2.4) widerlegt.

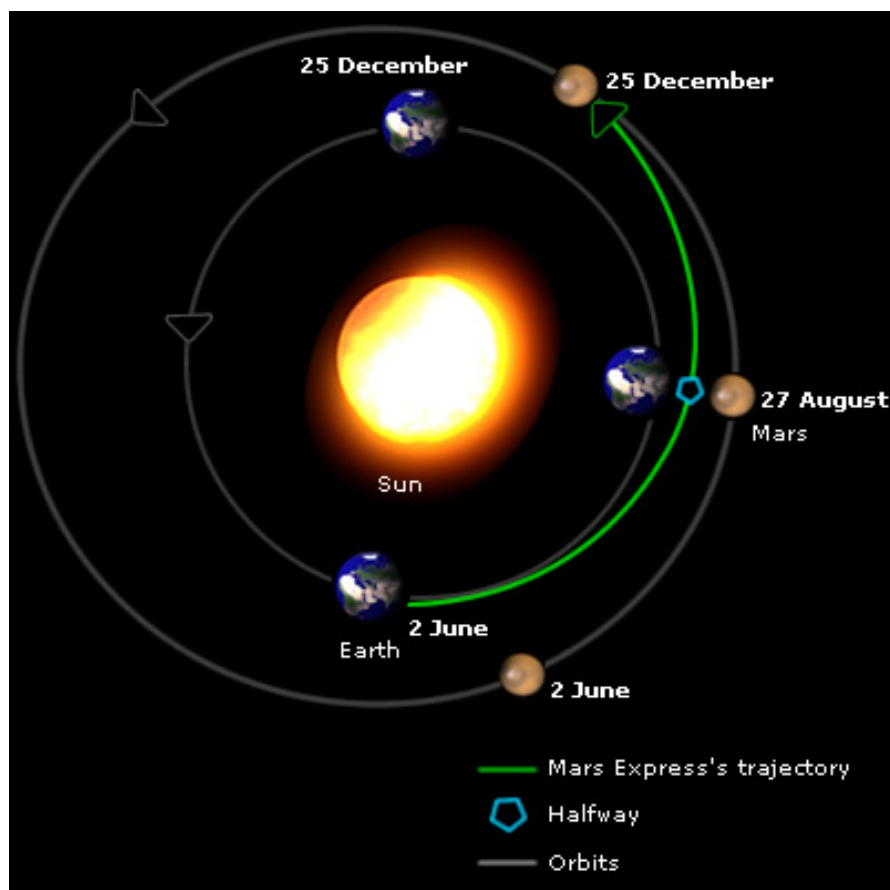


Abb. 8: Reiseverlauf von Mars Express, Quelle ESA

Nach dem erfolgreichen Einschwenken des Orbiters in eine hochelliptische Umlaufbahn wurde am 28. Januar 2004 der endgültige Orbit erreicht. Nach einer weiteren Orbitänderung beträgt die Perizentrumshöhe durchschnittlich 287 km und die Apozentrumshöhe 10 117 km bei einer Umlaufzeit von 6,72 Stunden und 86° Inklination. In Abb. 9 ist diese Bahn physikalisch korrekt dargestellt, die Bahnebene des Mars verläuft im Bild horizontal. Das Perizentrum der MEX-Bahn wandert mit der Zeit von Norden nach Süden bzw. von Süden nach Norden, so dass im Laufe der Mission die gesamte Oberfläche des Mars in hoher Auflösung abgedeckt werden kann. Detaillierte Informationen zum Bahndesign sind in (Hechler et al. 2005) und (Pulido-Cobo & Schoenmaekers 2004) zu finden.

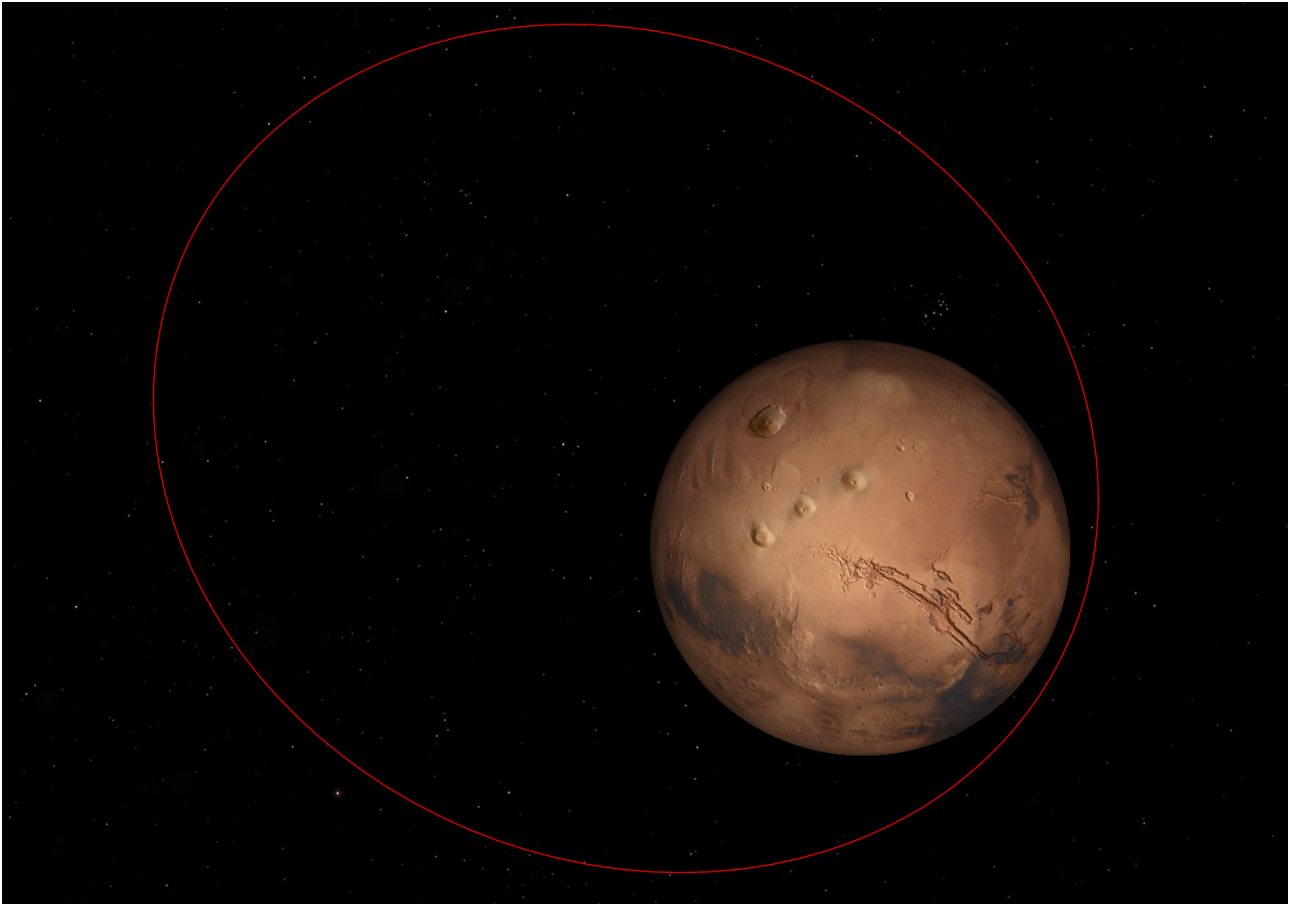


Abb. 9: Bahn von Mars Express

Die wissenschaftlichen Ziele des Orbiters sind (Chicarro et al. 2004):

- Aufnahme globaler stereoskopischer Bilder in hoher Auflösung
- Globale mineralogische Kartierung aus Spektrometer-Daten
- Detektion von Strukturen unter der Oberfläche mit Radarstrahlen
- Bestimmung der globalen atmosphärischen Zirkulation und Zusammensetzung der Atmosphäre
- Untersuchung der Interaktion der Atmosphäre mit der Oberfläche und dem interplanetaren Medium
- Analyse der Atmosphäre, Oberfläche und des Schwerefelds mit Radiowellen

Die Aufgabe des Landemoduls Beagle 2 (Pullan et al. 2004) war die Suche nach Zeichen von Leben. Dazu sollten auf der Oberfläche geologische, mineralogische und geochemische Analysen von Felsgestein und Boden durchgeführt werden. Außerdem waren Untersuchungen der Atmosphäre und die Entnahme einer Probe des Untergrunds mit Hilfe eines Geräts geplant, das selbsttätig graben kann. Die Missionsdauer von MEX war zunächst für ein Marsjahr angesetzt, was zwei Erdjahren entspricht. Nach der mittlerweile zweiten Verlängerung wird MEX noch bis mindestens Mai 2009 Daten liefern.

2.3.2 Instrumente

Im Folgenden sollen die einzelnen Instrumente an Bord von MEX mit Literaturhinweisen kurz vorgestellt werden:

High Resolution Stereo Camera (HRSC): Bei dieser Zeilenkamera handelt es sich um das Ersatzgerät aus der Mars 96-Mission. Sie liefert mit ihren neun CCD-Zeilen multispektrale, stereoskopische Bilder mit bis zu 11 m Auflösung. Außerdem ist mit dem Super Resolution Channel (SRC) noch ein Flächensensor mit einem eigenen Objektiv vorhanden, womit Detailaufnahmen von ca. 2,5 m Auflösung eingebettet in den HRSC-Streifen möglich sind. Eine Beschreibung der Kamera befindet sich in (Neukum & Jaumann 2004); im Bericht (Jaumann et al. 2007) sind die geologischen Erkenntnisse aus diesem Experiment zusammengestellt.

Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer (OMEGA): Dieses abbildende Spektrometer erstellt eine globale mineralogische Karte des Mars mit einer Auflösung von 100 m. Zur Bestimmung der Mineralien wird das von der Oberfläche des Mars reflektierte Licht im Bereich 0,5–5,2 μm gemessen. Das Experiment und das Instrument wird in (Bibring et al. 2004) beschrieben; Ergebnisse sind in (Bibring et al. 2006) zusammengefasst.

Planetary Fourier Spectrometer (PFS): Dieses Instrument soll die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmen. Es misst die von Molekülen absorbierten Wellenlängen im Bereich 1,2–45 μm . Auch der Druck- und Temperaturverlauf in den Atmosphärenschichten soll bestimmt werden. Eine Beschreibung des Instruments befindet sich in (Formisano et al. 2004a, 2005). Ein wichtiges Ergebnis dieses Experiments war die Entdeckung von Methan in der Atmosphäre (Formisano et al. 2004b), das aus vulkanischer oder biologischer Aktivität stammen kann.

Sub-Surface Sounding Radar Altimeter (MARSIS): Mit einer 40 m langen Antenne werden Radarstrahlen ausgesandt, die zum Teil auch einige Kilometer in das Innere des Planeten eindringen können und dort an Schichten wie z. B. Wasser oder Eis reflektiert werden. Auch zur Untersuchung der Ionosphäre eignet sich das Gerät. Die Antenne wurde allerdings erst im November 2005 in einem viermonatigen Prozess vollständig entfaltet, da Simulationsrechnungen auf mögliche Probleme hinwiesen. In (Picardi et al. 2004) befindet sich eine Beschreibung des Instruments; erste Ergebnisse sind in (Picardi et al. 2005) und (Gurnett et al. 2005) zusammengefasst. Wichtige Ereignisse sind die Entdeckung von einigen Einschlagbecken mit Durchmessern von 130–470 km unter der Kruste im nördlichen Flachland (Watters et al. 2006) und die Entdeckung von riesigen Wassereisvorkommen am Südpol (Plaut et al. 2007).

Energetic Neutral Atoms Analyser (ASPERA): Dieses Instrument untersucht das Plasma am Rand der Atmosphäre. Da der Mars nur über ein sehr schwaches Magnetfeld verfügt, kann der Sonnenwind mit den Atomen der Atmosphäre interagieren, was für den Verlust der einst dichten Atmosphäre des Mars verantwortlich sein soll. Eine Beschreibung des Instruments ist in (Barabash et al. 2004) und Ergebnisse sind in (Lundin et al. 2004) zu lesen.

Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer (SPICAM): Dieses Gerät zur Untersuchung der Atmosphäre misst die Absorption von Ozon im UV-Bereich (250 nm) und Wasserdampf im IR-Bereich (1,38 μm). Das Experiment und das Instrument wird in (Bertaux et al. 2004) beschrieben; Ergebnisse sind in (Bertaux et al. 2005a, 2005b, 2005c) dargestellt.

Mars Radio Science Experiment (MaRS): Wie bei allen planetaren Missionen wird das zur Erde gesandte Funksignal dazu genutzt, die Atmosphäre und das Gravitationsfeld zu untersuchen. Aber auch die Oberflächenrauigkeit wird anhand der Art der Reflektion abgeleitet. Das Experiment wird in (Pätzold et al. 2004, 2005) beschrieben.

2.3.3 High Resolution Stereo Camera (HRSC)

2.3.3.1 Übersicht über die Kamera

Die HRSC wurde Anfang der 90er Jahre am Institut für Optoelektronik des DLR in Oberpfaffenhofen entwickelt und bei Dornier-Satellitensysteme (heute EADS Astrium) in Friedrichshafen gebaut. Das FM1 (Flight Model 1) der HRSC sollte, wie einige andere Instrumente auf MEX auch, ursprünglich schon auf Mars 96 zum Einsatz kommen. Nach dem Scheitern dieser Mission (vgl. 2.2.4) wurde das sogenannte Qualification Model (QM) nach leichter Modifizierung der Elektronik für den Flugzeugeinsatz tauglich gemacht und war als HRSC-A bis zum Jahr 2001 im Einsatz (Wewel et al. 1998, Neukum et al. 1999). Aus dieser Kamera ist die Neuentwicklung HRSC-AX entstanden, die mit 12 000 Pixeln, einer Brennweite von 151 mm und einer etwas anderen Anordnung der Zeilen ausgestattet ist (Neukum et al. 2001, Scholten et al. 2002). Des Weiteren existiert die Weitwinkelvariante HRSC-AXW mit 47 mm Brennweite und nur drei Stereosensoren und zwei Farbkanälen. Das FM2 (Flight Model 2) der HRSC ist jetzt schließlich auf MEX im Einsatz (s. Abb. 10).



Abb. 10: HRSC FM2 für Mars Express, Quelle: DLR

Die HRSC besitzt neun CCD-Zeilen, die parallel auf drei Fokalplatten hinter einem Apo-Tessar-Objektiv (Kingslake 1978) mit 175 mm Brennweite angeordnet sind. Vor dem Objektiv schirmt ein Baffle das Blickfeld gegen Streulicht ab, das in Abb. 10 oben zu sehen ist. Darunter befindet sich der Kamerakopf des SRC, der auf dem FM1 für Mars 96 noch nicht vorhanden war. Dieser zusätzliche panchromatische Kanal ist mit einem CCD-Flächensensor hinter einem Maksutov-Cassegrain Teleobjektiv mit 975 mm Brennweite ausgestattet, der hochauflösende Detailaufnahmen eingebettet in den HRSC-Bildstreifen liefert. Zusammen mit der Elektronik (Digital Unit) wiegt die gesamte Kamera etwa 20 kg bei einem Stromverbrauch von annähernd 50 W inklusive der Beheizung der Objektive.

Die neun CCD-Zeilen bestehen aus jeweils 5272 Pixeln mit einer Pixelgröße von $7\mu\text{m}$ bei 8 Bit radiometrischer Auflösung, von denen im Betrieb jedoch nur 5176 aktiv Bilddaten liefern. Die inaktiven Randpixel dienen lediglich der radiometrischen Kalibrierung. Die Anordnung der Zeilen (s. Abb. 11) ermöglicht eine simultane Stereoprozessierung der fünf panchromatischen Kanäle (ND, S1, S2, P1, P2), ohne dass sich die atmosphärischen Bedingungen und Beleuchtungsverhältnisse ändern. Bei früheren Missionen führten solche Änderungen bedingt durch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte zu Problemen bei der Auswertung. Weitere technische Details sind in (Neukum & Jaumann 2004) und (Jaumann et al. 2007) beschrieben. Die Charakteristik der einzelnen Kanäle ist Tabelle 1 bzw. Abb. 12 zu entnehmen.

Kanal	Abkürzung	Nadirwinkel	Spektralbereich
Nadir	ND	0°	$675 \pm 90 \text{ nm}$
Stereo 1/2	S1, S2	$\pm 18,9^\circ$	$675 \pm 90 \text{ nm}$
Photometrie 1/2	P1, P2	$\pm 12,8^\circ$	$675 \pm 90 \text{ nm}$
Blau	BL	$-3,3^\circ$	$440 \pm 45 \text{ nm}$
Grün	GR	$+3,3^\circ$	$530 \pm 45 \text{ nm}$
Rot	RE	$-15,9^\circ$	$750 \pm 20 \text{ nm}$
Nahes Infrarot	IR	$+15,9^\circ$	$970 \pm 45 \text{ nm}$

Tabelle 1: Charakteristik der einzelnen CCD-Zeilen der HRSC

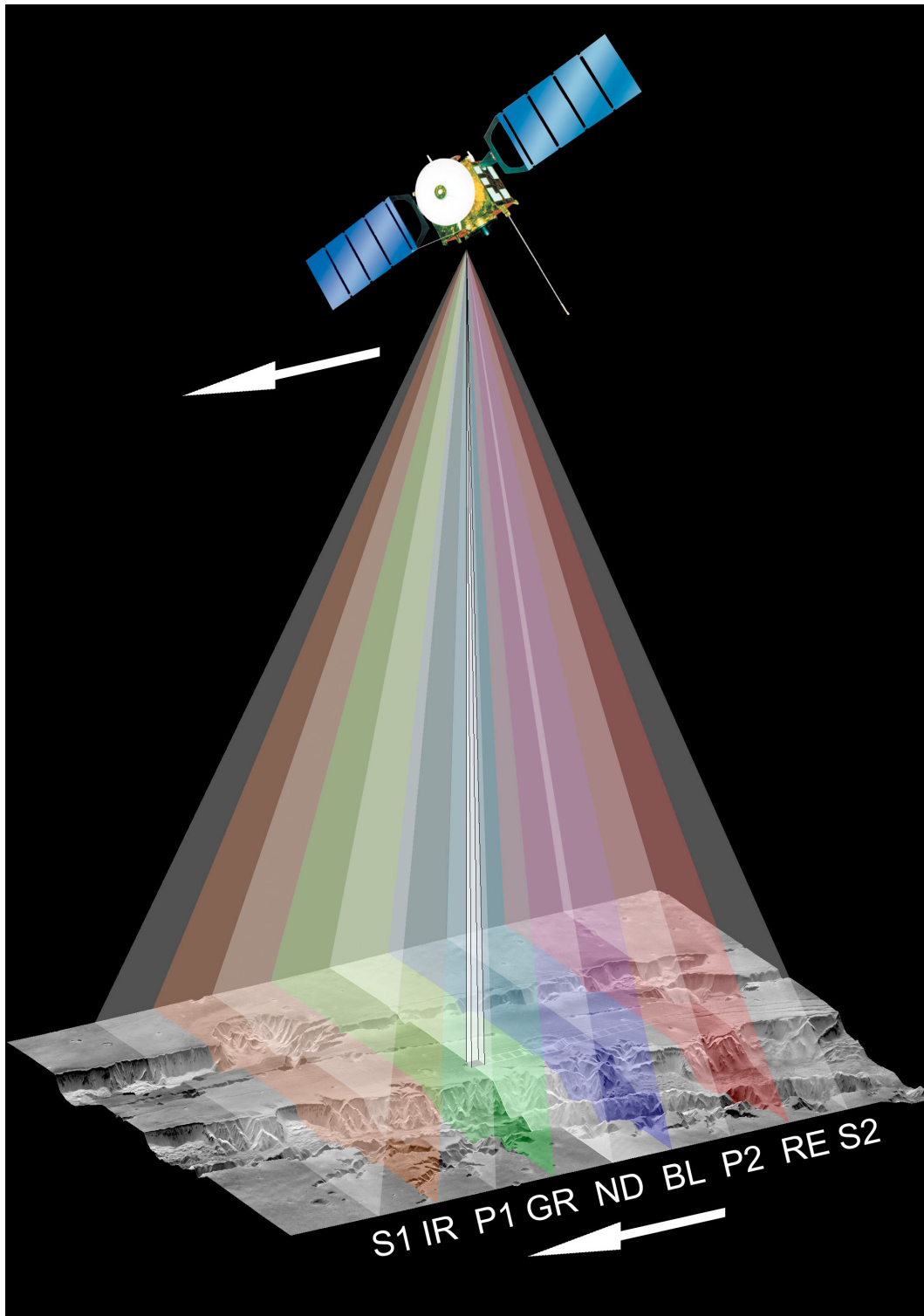


Abb. 11: Aufnahmeprinzip der HRSC mit eingebettetem SRC, Quelle: DLR

Der Flächensensor vom SRC besitzt 1024×1032 Pixel mit einer Größe von $9 \mu\text{m}$ und 14 Bit radiometrischer Auflösung. Das Blickfeld von $0,543^\circ$ einer Aufnahme überdeckt im Perizentrum am Boden eine Fläche von etwa $2,5 \times 2,5 \text{ km}$ bei einer Pixelgröße von ca. $2,5 \text{ m}$. Üblicherweise werden sieben Bilder in Serie aufgenommen, die sich zur Mosaikierung leicht überlappen. Stereophotogrammetrie ist damit allerdings nicht möglich. Wegen thermischer Probleme sind die Bilder der SRC etwas unscharf und enthalten Geisterbilder. Zusätzlich trüben Hotpixel, Rauschen und Bewegungsunschärfe die Bildqualität, so dass die Bilder rechnerisch rekonstruiert werden müssen (Oberst et al. 2008).

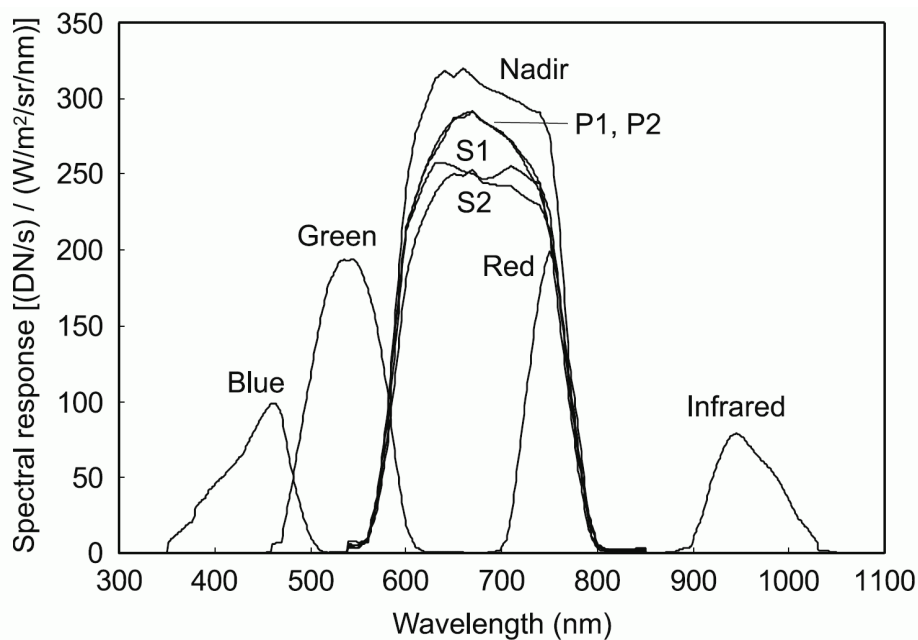


Abb. 12: Spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Kanäle der HRSC, Quelle: (McCord et al. 2007)

2.3.3.2 Kalibrierung

Die radiometrische Kalibrierung der Focal Plane Subunit (FPS) fand für das FM2 im Juli/August 1995 beim DLR in Oberpfaffenhofen statt. Die anschließende radiometrische und geometrische Kalibrierung des gesamten Kamerakopfes wurde im März/April 1996 bei Dornier in Friedrichshafen durchgeführt. Bei der radiometrischen Kalibrierung wurden folgende Punkte untersucht: Dunkelstrom, Linearität bei Sättigung, Spektralantwort, Flat Field. Es wurden als Ergebnis Kalibrationssequenzen für verschiedene Kombinationen aus Gain-Änderungen (s. 2.3.3.3), Makropixelformat (MPF), Integrationszeit und Temperatur erstellt.

Für die geometrische Kalibrierung wurde der Kamerakopf der HRSC auf einem Drehkipptisch (Manipulator) montiert, der zusammen mit einem Kollimator auf einer optischen Bank installiert ist. Im Brennpunkt des Kollimators befindet sich eine Lochblende, deren Bild auf die Fokalplatte der HRSC durch rückseitige Beleuchtung abgebildet wird (s. Abb. 13). Durch Rotation γ (quer zur Sensorzeile) und Neigung α (entlang der Sensorzeile) des Drehkipptisches kann die Projektion auf jedes aktive Pixel der HRSC abgebildet werden. Die Winkel wurden für jedes 400. Pixel bestimmt, die restlichen Werte wurden durch einen kubischen Spline interpoliert. Die Messgenauigkeit betrug in der Mitte der Zeile ungefähr $\pm 1''$ und am Rand $\pm 2''$. Durch leichte Defokussierung des Kollimators wurde der Unterschied zwischen Vakuum (Weltraum) und Luft (Labor) kompensiert. Um die gemessenen Winkel α und γ in das in der Photogrammetrie benutzte Koordinatensystem u, v der Inneren Orientierung umzurechnen, werden die Formeln (3) (Carsenty et al. 1997) verwendet:

$$v = \frac{v_P}{\cos \alpha} + f \cdot \tan \alpha \quad (3)$$

$$u = \frac{u_P}{\cos(-\gamma)} - v_P \cdot \tan(-\gamma) \cdot \tan \alpha - f \cdot \tan(-\gamma) \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$$

- mit
- α, γ Neigungs- und Rotationswinkel der Kamera
 - u, v Pixelkoordinaten in einer virtuellen Fokalebene
 - u_P, v_P Abweichung vom Bildhauptpunkt, der bei Pixel 2668 der Nadirzeile liegt
 - f Distanz zwischen virtueller Fokalebene und Drehmittelpunkt des Drehkipptisches

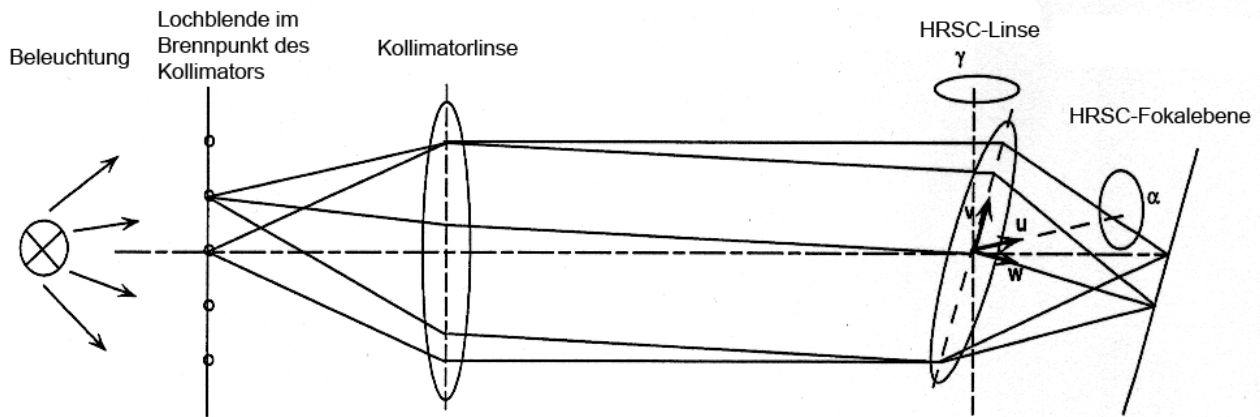


Abb. 13: Strahlengang bei der geometrischen Kalibrierung, Quelle: Carsenty et al. 1997

Die virtuelle Brennweite wurde auf 175 mm festgelegt, die geometrischen Beziehungen sind in Abb. 14 dargestellt. Weitere Details und Ergebnisse sind im Kalibrierungsreport (Carsenty et al. 1997) zu finden. Außer der Kalibrierung wurde die Kamera auch praktisch am Boden im März 1995 bei Dornier Friedrichshafen und in zwei Flugkampagnen im Mai und August 1997 getestet. Während der Reise zum Mars (Cruise Phase) konnte die geometrische Kalibrierung durch Aufnahme des Sternenhintergrunds nicht ausreichend überprüft werden, da nicht genügend Sterne abgebildet wurden. Da die Kamera Rütteltests auf der Erde bestanden hat, wurde davon ausgegangen, dass die Innere Orientierung stabil ist. Im Laufe der Mission war jedoch eine Verbesserung der Inneren Orientierung durch Selbstkalibrierung möglich (Spiegel & Neukum 2007, Spiegel 2007). Neben der Bestimmung des Winkels zwischen Raumschiffachse und optischer Achse der HRSC (Alignment), konnte auch die radiometrische Kalibrierung durch Aufnahmen von Sternen und Mond kontrolliert werden. Anzumerken ist hierbei, dass insbesondere der SRC durch einen Sonnensturm betroffen war, was sich mit einigen Hotpixeln bemerkbar macht. Anzumerken ist außerdem, dass an der TU München ein anderes Modell der Inneren Orientierung (Ohlhof & Kornus 1994) entwickelt wurde, das sich auch für Kameras mit mehreren Objektiven wie MOMS (Seige & Meissner 1993) eignet, welches in dieser Arbeit aber nicht zur Anwendung kommt.

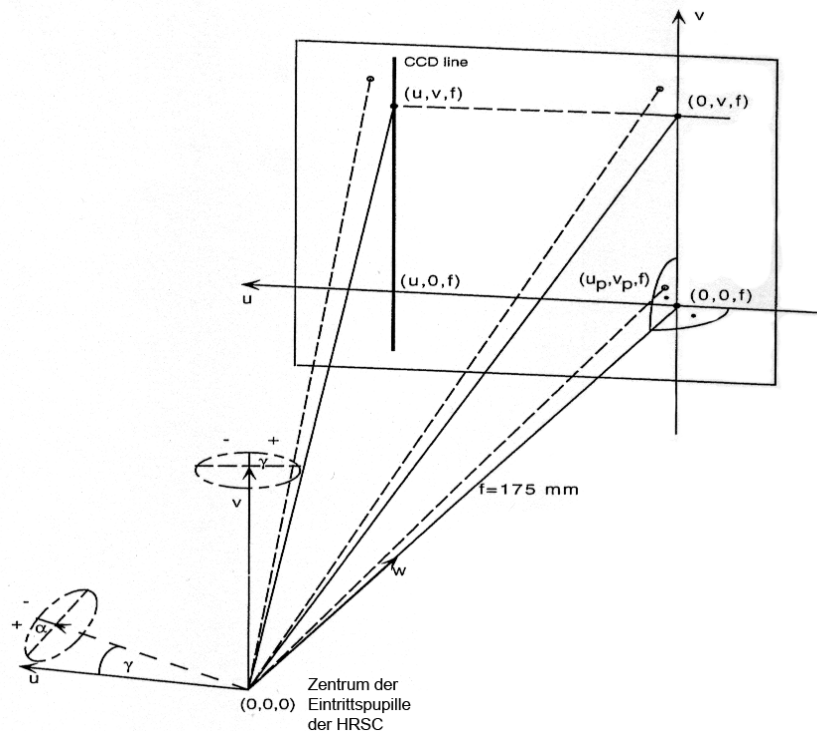


Abb. 14: Umrechnung der Messungen aus der Kalibrierung in das Koordinatensystem der Inneren Orientierung, Quelle: Carsenty et al. 1997

2.3.3.3 Bilddaten

Der Öffnungswinkel von 12° quer zur Flugrichtung führt im Perizentrum auf der Oberfläche zu einer Streifenbreite von ca. 60 km mit 12 m Pixelgröße. In Flugrichtung beträgt die Streifenlänge wegen der Begrenzung der Datenmenge durchschnittlich 1400 km bei einer Aufnahmezeit von 6 Minuten. Während der übrigen Zeit des Umlaufs muss die Batterie aufgeladen werden und die Datenübertragung erfolgen. Zum Datenempfang stehen auf der Erde die Empfangsstationen des ESTRACK (European Space Tracking) in New Norcia bei Perth (Australien) und ggf. Cebreros bei Madrid (Spanien) und manchmal die drei Stationen des Deep Space Networks (DSN) der NASA für ca. 8–14 Stunden täglich zur Verfügung. Wegen dieser Rahmenbedingungen auf der Erde, der zur Verfügung stehenden Datenrate zwischen Erde und Mars und den großen Datenmengen, die die Kamera liefert, müssen die Daten komprimiert werden. Dazu werden zwei Strategien angewandt: Die Pixel werden über sogenannte Makropixel aufsummiert, wobei die Pixelanzahl mit jeder Stufe um den Faktor 4 reduziert wird. In Flugrichtung wird das durch Verlängerung der Integrationszeit und quer zur Flugrichtung durch Aufsummierung und Mittelung von 2, 4 oder 8 Pixeln erzielt. Typischerweise wird der Nadirkanal in der vollen Auflösung übertragen (MPF 1), die beiden Stereokanäle mit 2×2 (MPF 2), die Photometrikanäle mit 4×4 (MPF 4) und die Farbkanäle mit 4×4 oder 8×8 (MPF 8). Je nach Anforderung der geplanten Untersuchung des Zielgebiets kann diese Konfiguration variiert werden. Zur weiteren Reduzierung der Daten werden die Bilder danach mit einer auf der Diskreten Kosinustransformation (DCT) basierenden Methode um den Faktor 2–20 verlustbehaftet komprimiert (s. 3.2.1).

Um möglichst quadratische Pixel zu erzielen, muss die Belichtungszeit wegen der Geschwindigkeitsänderung bei einer elliptischen Bahn (2. Kepler-Gesetz) von Zeit zu Zeit angepasst werden, was bei einer typischen HRSC-Aufnahme etwa siebenmal pro Orbit geschieht. Im Perizentrum wird normalerweise eine Integrationszeit von 2,5 ms eingestellt, der Wert wird allerdings im Bereich 2,24–54,5 ms zur Makropixelbildung und Bildung quadratischer Pixel verändert. Die einfallende Lichtmenge ändert sich mit unterschiedlichen Integrationszeiten und Albedowerten des Zielgebiets, weshalb der Verstärkungsfaktor (Gain) diesen Effekt kompensieren soll. Die einzelnen CCD-Zeilen werden zeitversetzt aktiviert, so dass neun Einzelbilder einen Bildstreifen (Szene) über dem gleichen Gebiet ergeben. Ein Beispiel für ein typisches kartenprojiziertes Bild ist in Abb. 15 zu sehen.

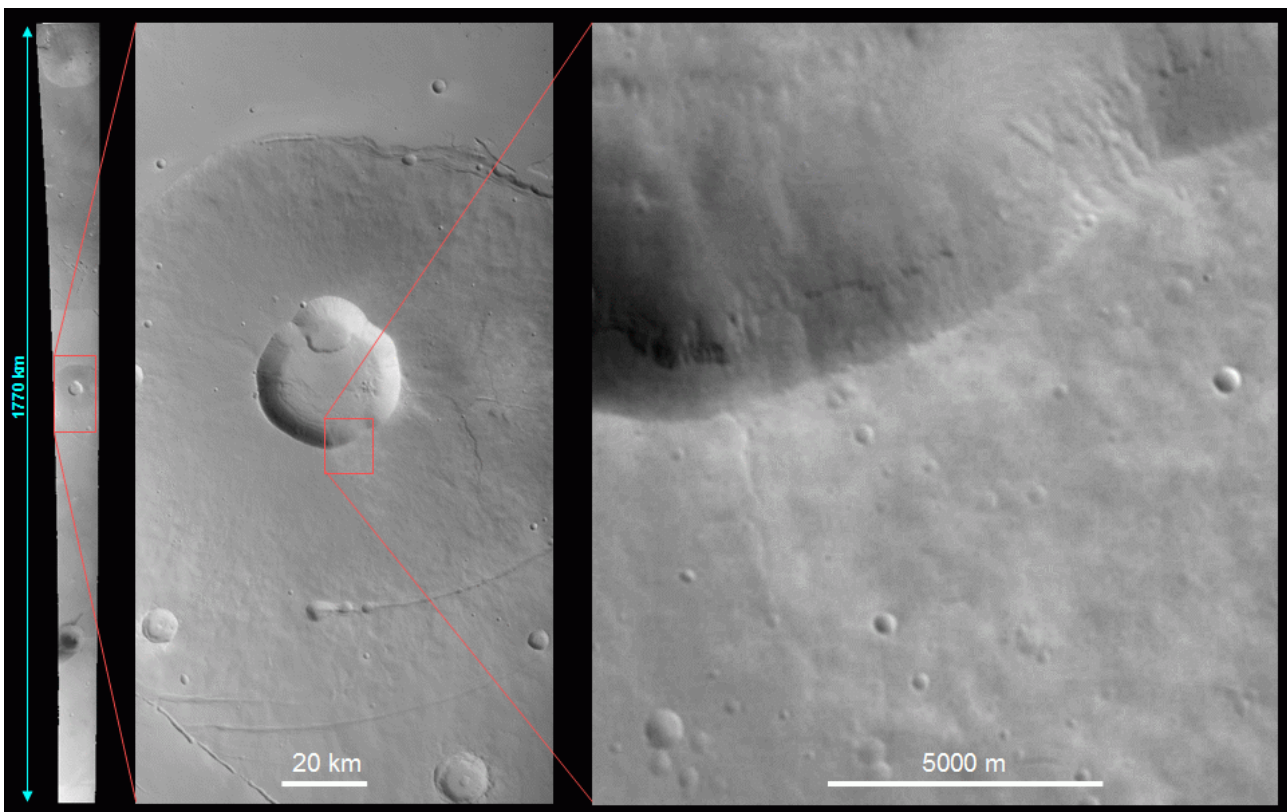


Abb. 15: Beispiel für ein HRSC-Bild, Vulkan Albor Tholus, Quelle: DLR

2.3.3.4 Bahn- und Lagedaten

Eine vollständige Marsumrundung wird Orbit genannt und aufsteigend durchnummeriert. Nicht in jedem Orbit erfolgt eine HRSC-Aufnahme, die Kamera kann aber pro Orbit mehrmals (normalerweise höchstens zweimal) eingeschaltet werden. Die Bilder der HRSC sind nach einem bestimmten Schema benannt, das auch in diesem Dokument verwendet wird: hoooo_mmmm.ddl.vv, mit h = Kamera-ID, oooo = Orbit-Nummer, mmmm = Bildnummer in einem Orbit, dd = Detektor-ID (nd, s1, s2, p1, p2, re, ir, gr, bl, sr), l = Prozessierungs-Level (0,1,2,3), vv = Version. Die Bahn von MEX ist so gewählt, dass der benachbarte Streifen 11 Orbits bzw. 3 Tage später überflogen wird (sog. 3:11 Resonanz). In der Anfangsphase der Mission (Commissioning Phase) vor der Orbitänderung lag die Resonanz noch bei 4:13. Die Verlagerung in Längsrichtung ist so geplant, dass sich eine Überlappung der benachbarten Streifen von ca. 10% ergibt. So entstehen Blöcke, die gemeinsam photogrammetrisch prozessiert werden können. Um das gewünschte Zielgebiet zu erfassen, stehen verschiedene Pointing Modes zur Verfügung: Nadir Pointing, Inertial Pointing und Spot Pointing. Beim Nadir Pointing wird der Nickwinkel der Sonde so nachgeführt, dass die optische Achse der HRSC immer zum Massenzentrum des Planeten zeigt. Mit einer zusätzlichen kleinen Drehung um den Gierwinkel wird die Marsrotation kompensiert, so dass alle Kanäle das gleiche Gebiet aufnehmen können. Von diesem Pointing Mode gibt es die beiden Abwandlungen „Across-Track Nadir“ und „Along-Track Nadir“. Bei „Across-Track Nadir“ wird es durch eine Drehung des Rollwinkels möglich, einen seitwärts gelegenen Streifen aufzunehmen. Im „Along-Track Nadir“ Modus ergibt sich durch einen Offset des Nickwinkels zur Nadirrichtung an der Oberfläche ein Inzidenzwinkel ungleich 0° . Beim Inertial Pointing werden alle drei Winkel in Bezug zum inertialen Raum konstant gehalten. In diesem Modus können z. B. die beiden Monde Phobos und Deimos beobachtet werden; auch bei Limb-Aufnahmen wird dieser Modus verwendet. Dabei wird die Atmosphäre vor dem Hintergrund des Firmaments am Rand der Planetenscheibe (Limb) aufgenommen. Das Spot Pointing ist schließlich für spezielle Beobachtungen von z. B. Phobos oder photometrischen Untersuchungen gedacht. In Abb. 16 ist ein typisches Nadir Pointing mit ND, S1 und S2 dargestellt. Die Aufnahme wird hier etwas abseits des Perizentrums durchgeführt, so dass die Flughöhe an dieser Stelle ungefähr doppelt so hoch wie bei der größten Annäherung ist.

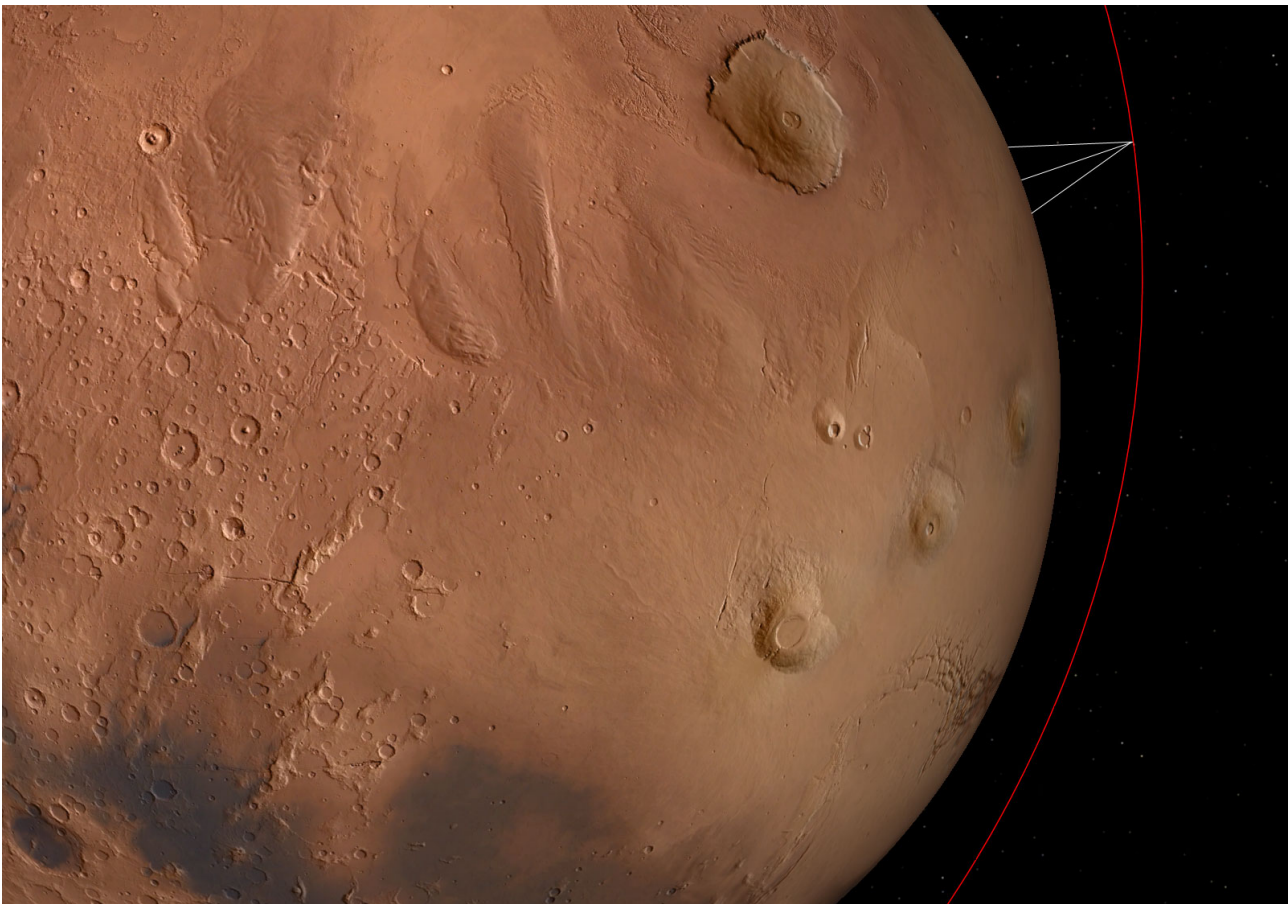


Abb. 16: Aufnahmekonfiguration von MEX mit ND, S1 und S2

Die Bahnparameter werden vom ESOC als SPICE-Kernel (<http://naif.jpl.nasa.gov/>) zur Verfügung gestellt. Die Position der Sonde ist zunächst aus der Aufnahmeplanung bekannt (Predicted Kernel), die bereits vier Wochen vorher festgelegt wird. Durch Dopplermessungen werden die Werte für die Position von Mars Express vom FDT (Flight Dynamics Team) ständig überwacht und verbessert (Reconstructed Kernel). Die absolute Genauigkeit der Position wird durch die Anzahl der Dopplermessungen, Anzahl der Bodenstationen, Aufnahmekonstellation und die Genauigkeit der Messung beeinflusst, während die relative Genauigkeit vor allem von der Genauigkeit des Schwerefelds abhängt. Von der ESA werden für die Genauigkeiten folgende Werte angegeben: $X=10\text{--}2120\text{ m}$ (entlang der Flugrichtung), $Y=2,5\text{--}795\text{ m}$ (quer zur Flugrichtung) und $Z=1\text{--}80\text{ m}$ (radial zum Marszentrum) (Hechler & Jáñez 2000). Der Unterschied zum Predicted Kernel beträgt durchschnittlich 2 km.

Die Lage der Sonde wird gemäß der Aufnahmeplanung kommandiert und mit Hilfe von Schwungrädern eingestellt. Die relative Genauigkeit wird alle 125 ms mit Kreiseln überprüft, und die absolute Lage wird alle 500 ms mit Hilfe eines Sternensensors kontrolliert (Lauer et al. 2004). Auftretende Differenzen zu den kommandierten Winkeln werden ggf. nachgesteuert. Die Genauigkeit wird vom ESOC mit 26 mgon für alle drei Lagewinkel angegeben. Die Werte für Position und Lage werden vom DLR aus dem SPICE-Kernel in ein globales marsfestes kartesisches Koordinatensystem mit den Werten $X, Y, Z, \varphi, \omega, \kappa$ mit Referenz IAU/IAG 2000 umgerechnet und als sogenannte Extori-Files zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wird noch die sogenannte Light Time Correction (Roatsch 2005) angebracht, die die Rotation des Mars während der Laufzeit des Lichts von der Oberfläche zur Kamera berücksichtigt.

In dieser Arbeit werden die Bilddaten der ersten 5000 Marsumrundungen berücksichtigt. Bei dem letzten berücksichtigten Orbit handelt es sich um h4995_0001, der am 22. November 2007 aufgenommen wurde. Eine Übersicht über die bis dahin erreichte Abdeckung der Oberfläche des Mars ist in Abb. 17 zu sehen.

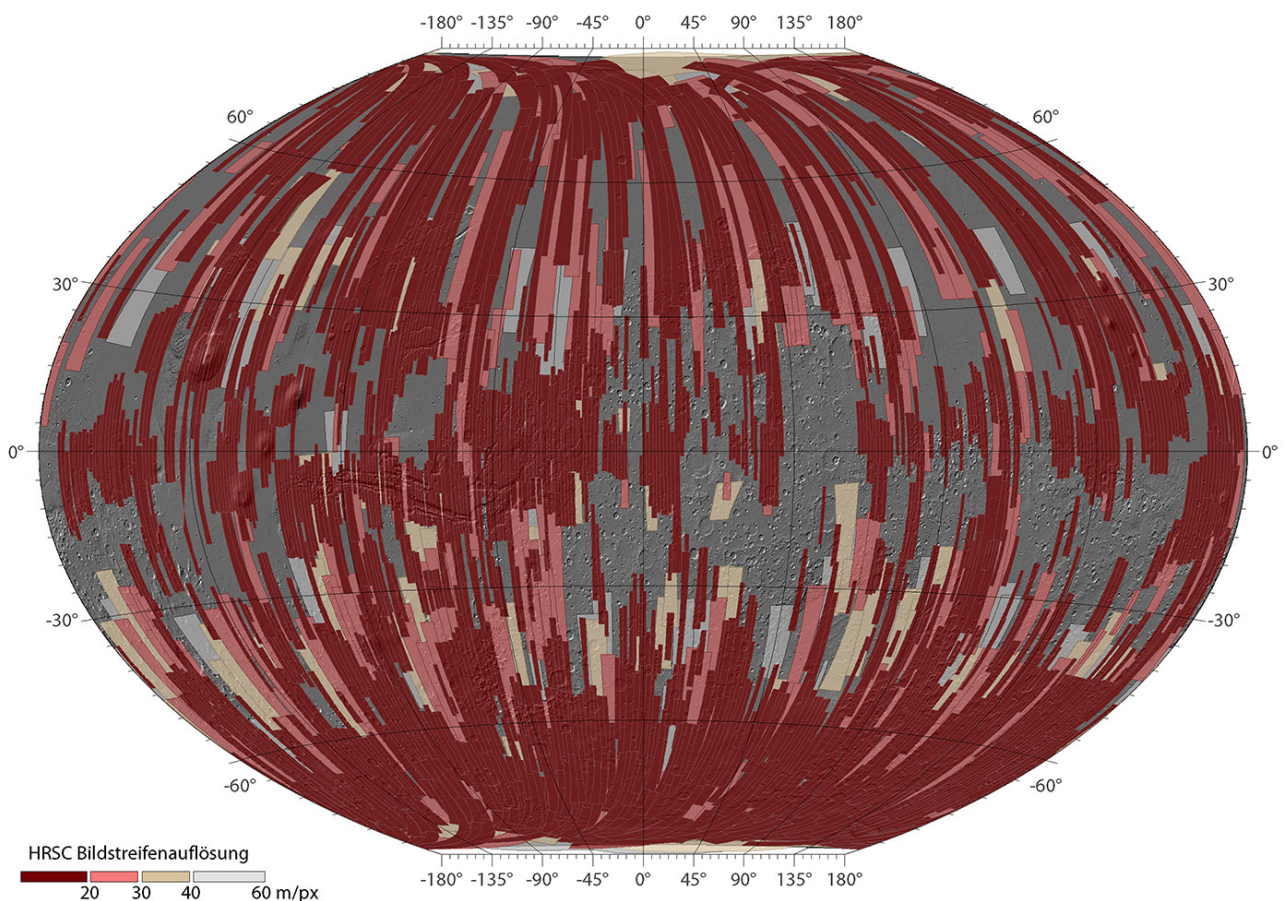


Abb. 17: Abdeckung mit HRSC-Streifen bis Orbit h4995_0001, Stand November 2007, Quelle: FU Berlin

2.4 Weitere aktuelle und zukünftige Missionen

Im Startfenster 2001 wurde die amerikanische Sonde Mars Odyssey (Saunders et al. 2004) gestartet und ist nach zweimaliger Missionsverlängerung immer noch aktiv. An Bord befinden sich folgende Instrumente: Neutron Spectrometer (NS) zur Detektion von Wasserstoff an der Oberfläche (Feldman et al. 2002), High Energy Neutron Detector (HEND) zur Detektion von Wassereis unter der Oberfläche (Mitrofanov et al. 2002), Thermal Emission Imaging System (THEMIS) zur mineralogischen und morphologischen Kartierung (Christensen et al. 2003, 2004), Gamma-Ray Spectrometer (GRS) zur Messung der von der Oberfläche emittierten Gamma-Strahlen (Boynton et al. 2004), Mars Radiation Environment Experiment (MARIE) zur Messung der Strahlenbelastung für zukünftige Astronauten (Badhwar 2004, Zeitlin et al. 2004) und Radio Science (RS) zur Bestimmung des Schwerefelds (Makovsky 2001). Das wichtigste Ergebnis der Mission war sicherlich die Entdeckung von Wassereisvorkommen insbesondere am Südpol (Boynton et al. 2002), das inzwischen von Mars Express bestätigt wurde (Plaut et al. 2007). Außerdem dient die Sonde im Moment noch als Relaisstation zur Datenübertragung der beiden Rover Spirit und Opportunity (s. u.).

Kurz nach dem Start von Mars Express wurden am 10. Juni und 8. Juli 2003 die Mars Exploration Rover (MER) (Crisp et al. 2003, Squyres et al. 2003, Cook 2005) mit den beiden fahrbaren Robotern Spirit (MER-A) und Opportunity (MER-B) gestartet. Die Landung von Spirit am 4. Januar 2004 im Gusev Krater (Squyres et al. 2004a, Arvidson et al. 2006) und von Opportunity am 25. Januar 2004 in Meridiani Planum (Squyres et al. 2004b, 2006a, 2006b) verlief erfolgreich. Diese Rover können sich auf der Oberfläche fortbewegen, dabei interessante Stellen anfahren und dort in situ Experimente durchführen. Die wichtigste Entdeckung ist der von Opportunity gefundene Hinweis auf ehemaliges flüssiges Wasser. Seit der Landung haben Spirit über 7km und Opportunity über 10km auf der Oberfläche zurückgelegt, und beide liefern immer noch Daten.

Am 12. August 2005 wurde die amerikanische Sonde Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) gestartet und erreichte am 10. März 2006 den Mars (Graf et al. 2005, Zurek & Smrekar 2007). Die relativ umfangreiche Mission hat folgende Instrumente an Bord: Shallow Radar (SHARAD) dringt zum Auffinden von Wassereis mit Radarstrahlen in den Untergrund ein (Seu et al. 2007), Mars Climate Sounder (MCS) bestimmt mit Spektralanalysen die zeitliche und räumliche Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre (McCleese et al. 2007), Radio Science (RS) zur Bestimmung des Schwerefelds (Zuber et al. 2007), Atmospheric Structure Investigation Accelerometers zur Bestimmung der Dichte der Atmosphäre während der Aerobraking-Phase, Engineering Experiments sind drei experimentelle Instrumente zum Testen von Kommunikation und Navigation, High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) liefert Bilder mit 30 cm Auflösung in Farbe (McEwen et al. 2007), Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) zur hyperspektralen mineralogischen Kartierung (Murchie et al. 2007), Mars Color Imager (MARCI) besteht aus einer Weitwinkelkamera mit einer Auflösung von ca. 8 km zur Untersuchung von atmosphärischen Phänomenen und einer Kamera mittleren Winkels mit 40 m Auflösung zur Beobachtung regionaler Gebiete in acht Spektralkanälen (Malin et al. 2001), Context Imager (CTX) dient der Aufnahme von Kontextbildern für HiRISE und CRISM Bilder (Malin et al. 2007).

Als erste Sonde im Rahmen des Mars Scout-Programms der NASA wurde am 4. August 2007 die Phoenix-Mission (Smith 2004) gestartet. Am 25. Mai 2008 wurde ein Landemodul in hohen Breiten auf der Oberfläche erfolgreich abgesetzt. Dort wird ab einer Tiefe von nur 50 cm unter der Oberfläche Wassereis vermutet, wie Ergebnisse von Mars Odyssey ergeben haben.

An zukünftigen Missionen soll zunächst im September/Oktober 2009 das Mars Science Laboratory (MSL) gestartet werden (Lockwood 2006 und folgende 13 Artikel). Der bislang größte Rover soll dann voraussichtlich im Juli/September 2010 auf der Oberfläche landen. Ebenfalls für Oktober 2009 ist die russische Mission Fobos-Grunt (Marov et al. 2004) geplant. Sie soll auf dem Mond Phobos landen und Proben zur Erde bringen. Ferner könnte im selben Monat mit Yinghuo-1 auch Chinas Marsprogramm beginnen. Die Planungen über 2009 hinaus sind noch etwas vage. Im Jahr 2013 soll die ursprünglich für das Jahr 2011 geplante zweite Sonde im Rahmen des Scout-Programms gestartet werden. Es stehen von 12 eingereichten Projektanträgen noch zwei Finalisten zur Auswahl, die sich beide mit der Untersuchung der Entwicklungsgeschichte der Atmosphäre beschäftigen. Die dritte Mission des Scout-Programms soll ersten Planungen nach schließlich im Jahr 2018 gestartet werden. Als Relaisstation ausschließlich zur Datenkommunikation soll der für 2013 geplante amerikanische Mars Science and Telecommunications Orbiter (MSTO) dienen. Das Aurora-Programm der ESA soll 2013 mit ExoMars beginnen, das einen Orbiter und einen Rover beinhaltet. Frühestens 2016, aber wahrscheinlich erst 2020 könnte die Mars Sample Return Mission Gesteinsproben zur Erde bringen, die vermutlich in Kooperation mit der NASA realisiert wird.

3 Bisherige Arbeiten

In diesem Kapitel wird im ersten Abschnitt die Digitale Bildzuordnung behandelt. Im zweiten Abschnitt werden Verfahren vorgestellt, die in dieser Arbeit zur Bildrekonstruktion der HRSC-Daten untersucht werden.

3.1 Digitale Bildzuordnung

Die digitale Bildzuordnung (Matching) ist ein Teilgebiet der Photogrammetrie und der Computer Vision (CV). Hierbei sollen automatisch aus zwei oder mehr digitalen Bildern räumliche Koordinaten einzelner Punkte oder die gesamte Oberfläche eines oder mehrerer Objekte durch Zuordnung korrespondierender Punkte bestimmt werden. Allgemeiner können die Bilder nicht nur aus verschiedenen Richtungen aufgenommen sein, sondern auch zu verschiedenen Zeiten, mit unterschiedlichen Sensoren, oder es soll ein Objekt einem Modell zugeordnet werden (Korrespondenzproblem). Die Anwendungsgebiete sind Bildorientierung, topographische Modellierung, Fernerkundung, Objekterkennung, Navigation, medizinische Bildverarbeitung (Radiologie), Qualitätskontrolle in industriellen Fertigungsprozessen und Steuerung autonomer Fahrzeuge. Im Rahmen dieser Arbeit sollen automatisch homologe Punkte zur Verknüpfung einzelner HRSC-Bilder oder benachbarter Streifen bestimmt werden. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über Verfahren zur digitalen Bildzuordnung gegeben.

Seit mehr als fünf Jahrzehnten werden Methoden zur Bildzuordnung entwickelt. Obwohl dieses Problem prinzipiell und mathematisch gelöst ist, existiert bislang in der Praxis kein System, das vollautomatisch und zuverlässig genaue Punkte liefern und sich dabei den verschiedensten Bildern und Situationen anpassen kann, da die zugrundeliegenden Modelle nicht vollständig beherrschbar sind und verallgemeinerte Annahmen die Realität nicht in Gänze korrekt beschreiben. Daher wurden vielfältige Methoden entwickelt, die mehr oder weniger spezielle Problemstellungen behandeln können. Eine allgemeingültige Einteilung dieser Verfahren gibt es nicht: Im Folgenden wird eine Einteilung nach verschiedenen wesentlichen Teilaspekten aufgestellt, wobei eine spezielle Methode immer auch eine Kombination der verschiedenen Teilaspekte darstellen kann. Auf die frühen analogen Methoden und die damals sogenannten Online-Verfahren mit spezialisierter Hardware der 60er, 70er und frühen 80er Jahre wird hier nicht eingegangen. Eine Übersicht über solche Geräte und Konzepte aus dem Bereich der Photogrammetrie wird in (Konecny & Pape 1981) gegeben. Auch die etlichen „Shape from X“ Techniken (X = Shading, Motion, Texture, Contour, Focussing etc., Weisensee 1990) werden hier nicht weiter behandelt, obwohl sich insbesondere Shape from Shading zur Rekonstruktion planetarer Oberflächen eignet (Lohse et al. 2006). Weitere Übersichten zu Bildzuordnungsverfahren für den Bereich Photogrammetrie und Fernerkundung ist u. a. in (Lemmens 1988, Fonseca & Manjunath 1996, Le Moigne et al. 1998) zu finden. Für den medizinischen Bereich sind folgende Übersichten empfehlenswert: (van den Elsen et al. 1993, Maintz & Viergever 1998, Lester & Arridge 1999, Audette et al. 2000, Ding et al. 2001, Hill et al. 2001). Übersichten allgemeinerer Art sind in (Ghaffary & Sawchuk 1983, Brown 1992, Zitová & Flusser 2003) dargestellt. Interessant sind sicherlich auch Vergleichstests mit mehreren Teilnehmern bzw. Implementierungen (Barnard & Fischler 1982, Dhond & Aggarwal 1989, Gülch 1991, Bolles et al. 1993, Heipke & Eder 1998, Scharstein & Szeliski 2002, Heipke et al. 2007).

3.1.1 Lokale und globale Verfahren

Eine Variante der Gliederung von Zuordnungsverfahren ist die Unterteilung in lokale und globale Methoden. Bei den lokalen Verfahren werden homologe Punkte durch die Zuordnung von Fenstern (Bildausschnitten) gefunden, während die globalen Methoden die ganzen Bilder pixelweise vergleichen.

3.1.1.1 Lokale Verfahren

Korrelation

Bei der grundlegenden Methode der Korrelation wird eine Mustermatrix mit einer Suchmatrix anhand eines Kriteriums verglichen, das das Maß für die Ähnlichkeit liefert (s. 3.1.3). Die Fenster können eine beliebige Form haben, meistens werden aber quadratische verwendet. Die Größe des Fensters bestimmt die Anzahl der zu vergleichenden Pixel, denn es müssen insbesondere in Bereichen mit wenig Textur genügend Grauwertvariationen für eine zuverlässige Korrelation vorhanden sein. Je mehr Pixel verwendet werden, desto geringer ist auch der störende Einfluss von Rauschen. Mit größeren Fenstern steigt allerdings auch die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb des abgedeckten Gebiets eine Höhenänderung vorhanden ist, die in aus verschiedenen Richtungen aufgenommenen Bildern unterschiedlich abgebildet wird. Dies hat zur Folge, dass nur noch Teilbereiche des Korrelationsfensters korrespondieren, was zu Fehlern insbesondere an Objektgrenzen, Verdeckungen und Bruchkanten führt. Bei den lokalen Methoden wird jedoch implizit

angenommen, dass im Fenster keine Höhenänderungen vorkommen. Es wird vorausgesetzt, dass die Objektoberfläche stückweise glatt ist (Marr & Poggio 1979), d. h. die Disparität* ändert sich nur langsam (kontinuierlich). Bei den lokalen Methoden ist die Festlegung der Fenstergröße ein kritischer Parameter und immer ein Kompromiss aus Detailgenauigkeit und Glättung der Oberfläche (Nishihara et al. 1983). Als weitere implizite Annahmen dürfen keine Maßstabsunterschiede, Winkel zwischen den Bildebenen und der Objektebene oder andere Bildverzerrungen vorhanden sein. Diese Phänomene können durch eine Vorentzerrung der Bilder wie z. B. Orthobild- oder Epipolarbildgenerierung vermindert oder beseitigt werden. Ist dies aber nicht möglich, sind noch Rotationen bis 20° und Maßstabsunterschiede bis 30% zu bewältigen (Förstner 1984). Neben den geometrischen Unterschieden müssen auch die radiometrischen berücksichtigt werden, was beispielsweise durch geeignete Grauwerttransformationen oder Ähnlichkeitsmaße erreicht werden kann. Eine Möglichkeit zur Verminderung der Fehler an Disparitätssprüngen ist die Verwendung von adaptiven Fenstern (Kanade & Okutomi 1994), die ihre Größe und Form iterativ je nach lokaler Variation der Grauwerte und Disparität ändern können. Dieser Ansatz führt zu einer Verringerung der Fehler, ist aber auch sehr rechenintensiv. Diverse andere Möglichkeiten wurden untersucht wie z. B. Formänderung des Fensters (Boykov et al. 1998), neun benachbarte Fenster mit verschobenen Zentren (Little 1992, Fusiello et al. 1997) und Kombinationen aus überlappenden Fenstern (Hirschmüller et al. 2002). Zur Detektion von Verdeckungen ist eine bidirektionale Zuordnung (Hannah 1989, Fua 1991, 1993) sehr gut geeignet, es sind aber auch andere Ansätze entwickelt worden (Egnal & Wildes 2002).

Kleinste Quadrate Zuordnung

Eine Erweiterung der Korrelation mit einem rechteckigen Fenster stellt die Kleinste Quadrate Zuordnung (LSM: Least Squares Matching) dar (Förstner 1982, Ackermann 1984). Hierbei wird eine Mustermatrix g_1 durch eine geometrische und eine radiometrische Transformation T_r auf eine Suchmatrix g_2 abgebildet:

$$g_1(x_1, y_1) = T_r[g_2(x_2, y_2)] \quad (4)$$

Die radiometrische Transformation kann z. B. eine Anpassung nach Helligkeit r_1 und Kontrast r_2 sein:

$$g_1(x_1, y_1) = r_1 + r_2 g_2(x_2, y_2) \quad (5)$$

Während bei der Korrelation eine horizontale Ebene für die Oberfläche angenommen wird und lediglich zwei Translationen bestimmt werden, können beim LSM auch mehr Parameter für die geometrische Transformation angesetzt werden. Die zumeist affine Transformation (s. Gleichung 6) nimmt implizit im Objektraum eine lokal planare Oberfläche an, so dass der Einfluss von Abbildungsverzerrungen durch Höhenunterschiede, unterschiedliche Winkel zwischen den Bildebenen und der Objektebene oder auch geringe Maßstabsunterschiede gemindert werden kann.

$$\begin{aligned} x_2 &= a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_1 \\ y_2 &= b_0 + b_1 x_1 + b_2 y_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Dieser Ansatz einer vermittelnden Ausgleichung bietet ein hohes Genauigkeitspotenzial, erfordert im Gegensatz zur Korrelation aber auch gute Näherungswerte. Unter Berücksichtigung der radiometrischen Transformation T_r sollen die Grauwertunterschiede zwischen den beiden Fenstern g_1 und g_2 minimiert werden:

$$v(x_1, y_1) = g_1(x_1, y_1) - T_r[g_2(a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_1, b_0 + b_1 x_1 + b_2 y_1)] \quad (7)$$

mit	$v(x_1, y_1)$	Verbesserungen
	$g_1(x_1, y_1)$	Grauwerte des ersten Fensters (Mustermatrix)
	$g_2(x_2, y_2)$	Grauwerte des zweiten Fensters (Suchmatrix)
	T_r	Radiometrische Transformation mit Unbekannten
	a_0, a_1, \dots	Unbekannte der geometrischen Transformation

* Die Disparität bezeichnet im CV den in zwei Bildern gemessenen Unterschied zwischen korrespondierenden Punkten. In der Photogrammetrie ist die Bezeichnung Parallaxe gebräuchlich.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die Erweiterbarkeit auf die simultane Ausgleichung mehrerer Bilder (Agouris & Schenk 1992) und/oder die Verwendung geometrischer Bedingungen (Kollinearitätsgleichungen) (Grün 1985, Grün & Baltsavias 1988, Agouris & Schenk 1996), um die Zuverlässigkeit der Lösung zu erhöhen. Die implizite Annahme einer lokal planaren Oberfläche im Falle einer affinen Transformation erfordert möglichst kleine Fenster. Um alle Parameter der Ausgleichung signifikant bestimmen zu können, die Präzision zu erhöhen und um die Rauschanfälligkeit zu vermindern, sind wie bei der Korrelation große Fenster wünschenswert. Die Fenstergröße muss also je nach vorliegenden Daten sorgfältig angepasst werden.

Mehrpunktzuordnung

Als eine Verallgemeinerung des LSM kann die Mehrpunktzuordnung (Multi-Point Matching) betrachtet werden (Rosenholm 1986). Hierbei wird der Bildraum in ein Gitter mit jeweils einer bestimmten Anzahl von Bildelementen (Pixeln) unterteilt. Die Gitterpunkte sind mit bilinearen Funktionen verbunden, die die Parallaxenunterschiede in Epipolarrichtung beschreiben. Zwei radiometrische Parameter (s. Gleichung 5) werden dabei verwendet. Es können zusätzliche Randbedingungen eingebaut werden, wie z. B. dass die erste oder zweite Ableitung der Parallaxen Null sein muss, was einer Minimierung der Krümmung bzw. Neigung entspricht. In einer Ausgleichung werden simultan alle unbekannt Parallaxen bestimmt, wobei die Innere und Äußere Orientierung als bekannt vorausgesetzt werden sollte. Schwierig ist bei dieser Methode die Festlegung der Gitterweite und der Gewichte zwischen den Gitterpunkten. Ein dichtes Netz ergibt ein detaillierteres DGM, die Lösung wird durch die Erhöhung der Unbekanntenzahl allerdings auch instabiler. Der kritische Punkt ist jedoch die Wahl des Gewichts zwischen den Gitterpunkten, womit geometrisch und radiometrisch nicht alle Fälle korrekt modelliert werden. Dementsprechend ergeben sich die Schwierigkeiten insbesondere an Diskontinuitäten und Verdeckungen. In (Li 1989) wurde versucht, Bruchkanten zu detektieren und zu modellieren. Dies ist aber nur unter einigen Voraussetzungen (nur eine Bruchkante pro Gitter, Modellierung als gerade Linie, keine Parallaxenänderungen entlang der Linie, genügend Textur um die Bruchkante herum) möglich, und es wurde daher nur an synthetischen Daten getestet. Insgesamt betrachtet haben sich in praktischen Tests für die Mehrpunktzuordnung gegenüber dem klassischen LSM keine Vorteile ergeben (Rosenholm 1987).

Zuordnung im Objektraum

Einen ähnlichen Ansatz wie die Mehrpunktzuordnung stellt die Zuordnung im Objektraum, oder Facetten-Stereo-Sehen, dar (Helava 1988, Ebner et al. 1987, Wrobel 1987). Hierbei handelt es sich um die Verbindung aller Informationen über Bildraum (Grauwerte), Geometrie, Radiometrie und Objektraum in einem einheitlichen Modell. Die Bildzuordnung, Orientierung, DGM-Erstellung und Orthoprojektion erfolgt dabei simultan in einer Ausgleichung, wobei auch hier wie bei der Mehrpunktzuordnung zur Reduzierung der Unbekannten die Innere und Äußere Orientierung als bekannt vorausgesetzt werden sollten. Es wird im Objektraum jeweils ein geometrisches und ein radiometrisches Gittermodell aufgestellt. Die Verbindung zum Sensormodell erfolgt über die Kollinearitätsgleichungen und über ein Reflexionsmodell. Die Gitterweite des radiometrischen Modells entspricht meistens der Pixelgröße des Bildes am Boden, die Gitterweite des geometrischen Modells muss wie bei der Mehrpunktzuordnung sinnvoll gewählt werden. Auch hier können die oben erwähnten zusätzlichen Bedingungen für die Glattheit des Geländes eingeführt werden. Bei dieser Methode sind neben der gegenseitigen Parameterabhängigkeit die Annahmen über die Glattheit des Geländes und das Reflexionsmodell die größten Probleme bei der Umsetzung in die Praxis. Die Folgen können Konvergenzprobleme, hoher Rechenaufwand und inkorrekte Ergebnisse sein. Ein Test mit vier Luftbildern und einem Datensatz aus dem Nahbereich werden in (Heipke 1990) mit Schwerpunkt Konvergenzradius und Einfluss von Bildpyramiden untersucht.

3.1.1.2 Globale Verfahren

Bei den lokalen Ansätzen können die Fehler an Höhendiskontinuitäten zwar verringert aber nicht vermieden werden. Globale Algorithmen arbeiten mit expliziten Annahmen über die Glattheit der Oberfläche, indem die Kostenfunktion einen zusätzlichen Glattheitsterm (Terzopoulos 1986) enthält. Das Ziel ist die Minimierung einer globalen Energiefunktion:

$$E(d) = E_{Data}(d) + \lambda E_{Smooth}(d), \quad (8)$$

wobei $E_{data}(d)$ die globale Summe der Zuordnungskriterien angibt, $E_{smooth}(d)$ die Glattheitsannahmen zwischen benachbarten Pixeln formuliert und λ den Einfluss des Glattheitsterms reguliert. Die einzelnen globalen Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Methode, wie die Energiefunktion (8) aussieht und minimiert wird. Hierfür stehen zahlreiche Verfahren wie Simulated Annealing (Geman & Geman 1984, Barnard 1989), Dynamic

Programming (Belhumeur & Mumford 1992, van Meerbergen et al. 2002), Cooperative Algorithms (Dev 1975, Marr & Poggio 1976, Marroquin 1983, Zitnick & Kanade 2000), Semi-Global Matching (Hirschmüller 2005), Maximum Flow (Roy 1999) bzw. Graph Cuts (Veksler 1999, Boykov et al. 2001, Kolmogorov & Zabih 2001) und Belief Propagation (Felzenszwalb & Huttenlocher 2006, Sun et al. 2003, Klaus et al. 2006) zur Verfügung. Bei diesen Verfahren werden meistens sehr gute Näherungswerte und Epipolarbilder vorausgesetzt, so dass Parallaxen nur in Zeilenrichtung vorkommen. Beim Simulated Annealing wird iterativ eine gute Annäherung an das globale Optimum gesucht, wobei von einem Ausgangsenergiezustand benachbarte Zustände ausprobiert und ggf. für die nächste Iteration übernommen werden. Die Energie bzw. Temperatur wird so lange abgesenkt, bis eine Schranke unterschritten wird und ein Zustand mit niedriger Energie erreicht ist. Dieses lokale Minimum kann allerdings vom globalen Minimum weit entfernt sein (Greig et al. 1989), und dabei kann das Verfahren sehr viel Rechenzeit beanspruchen. Dynamic Programming (DP) ist eine effiziente Methode, den günstigsten Pfad durch eine Matrix aller paarweisen Zuordnungen zwischen zwei korrespondierenden Zeilen zu suchen. Da die Parallaxen nur in horizontaler Richtung (bzw. entlang der Epipolarlinien) auftreten, kann die Suche auf eine Dimension entlang der Zeilen beschränkt werden. Durch die isolierte Betrachtung einzelner Zeilenpaare werden die Beziehungen zu den umliegenden Zeilen vernachlässigt, und es ergeben sich streifige Artefakte im Disparitätsbild. Die kooperativen Algorithmen lassen ausgehend von lokalen Korrelationen nichtlineare Beziehungen (Diffusion) zwischen benachbarten Werten zu bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Dieses Verfahren verhält sich somit ähnlich wie ein globales Optimierungsverfahren. Das Semi-Global Matching ist eine effiziente Methode, die Nachteile des DP zu mindern. Es wird dazu nicht nur eindimensional entlang korrespondierender Zeilen, sondern durch Kombination der Ergebnisse entlang von 8 oder 16 Pfaden vertikal und diagonal dazu ein Minimum gesucht. In Erweiterung zum DP können Max-Flow bzw. Graph Cuts-Algorithmen ein mehrdimensionales kombinatorisches Problem lösen (Ahuja et al. 1993). Mehrdimensional bedeutet hier, dass die Suche nach dem Minimum zweidimensional auch über benachbarte Zeilen erfolgt. Die Disparitätsoberfläche wird als ein Fluss durch einen Graphen betrachtet, wobei zwischen den einzelnen Knoten eine bestimmte Menge fließen kann, der Gesamtfluss aber erhalten bleibt. Es wird nun der maximal mögliche Fluss durch den Graphen gesucht. Diese Verfahren liefern gute Ergebnisse, benötigen aber auch viel Rechenzeit. Belief Propagation verfolgt einen ähnlichen Ansatz, indem das Zuordnungsproblem mit drei Markov Random Field (MRF) Modellen (Markovsche Zufallsfelder) als ein Graph formuliert wird (Maximum a Posteriori MRF). Die drei MRFs modellieren dabei die Disparitäten, Diskontinuitäten und Verdeckungen, danach wird für das Netzwerk mittels Bayesian Belief Propagation eine optimale Lösung gesucht. Die einzelnen Knoten des Graphen können dabei Nachrichten mit Wahrscheinlichkeiten über die Disparität des Empfängers austauschen, die auf allen Informationen des Senders beruhen. Einen Vergleich über Methoden zur MRF-Energieminimierung wird in (Szeliski et al. 2006, 2008) durchgeführt. Einen ausführlichen Vergleich globaler und lokaler Methoden anhand von Testbildern wird in (Scharstein & Szeliski 2002) präsentiert.

3.1.2 Flächen- und merkmalsbasierte Verfahren, Relationale Zuordnung

3.1.2.1 Grundsätzliche Unterschiede

Bildzuordnungsverfahren können in flächenbasierte (Area Based), merkmalsbasierte (Feature Based) und relationale Ansätze unterschieden werden. Bei den flächenbasierten Verfahren erfolgt die Zuordnung korrespondierender Punkte ausschließlich über die Grauwerte. Beispiele dafür sind die im vorherigen Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Verfahren der Korrelation und der Kleinsten Quadrate Zuordnungen. Bei den merkmalsgestützten Verfahren werden zunächst geeignete Merkmale (Features) in den Bildern detektiert und diese anschließend anhand ihrer Attribute zugeordnet. Als Merkmale kommen Punkte, Linien und Flächen in Frage, die dabei bestimmte Anforderungen erfüllen müssen. Sie sollten global oder zumindest in ihrer näheren Umgebung einzigartig sein, um von den restlichen Merkmalen unterscheidbar zu sein. Sie sollten eine gewisse Stabilität gegenüber radiometrischen und geometrischen Transformationen und Rauschen aufweisen, um zu gewährleisten, dass in den unterschiedlichen Bildern korrespondierende Merkmale gefunden werden können. Eine weitere Forderung ist je nach Anwendungsfall Subpixel-Genauigkeit und geringer Rechenaufwand. Je abstrakter die symbolische Beschreibung des Bildes erfolgt, desto robuster wird das Verfahren bezüglich Näherungswerten und radiometrischen oder geometrischen Unterschieden. Mit steigendem Abstraktionsgrad verliert man allerdings auch an Genauigkeit und insbesondere an Detailliertheit, so dass sich diese Verfahren nicht für eine dichte Oberflächenrekonstruktion eignen. Linien sind außerdem gegenüber Punkten invarianter bezüglich geometrischer Transformationen. Sie können zur Beschaffung von Näherungswerten verwendet werden, und die endgültige Zuordnung erfolgt mittels Punkten. Abgesehen davon bietet sich eine Kombination von Area Based- und Feature Based-Verfahren an. Es werden zunächst geeignete bzw. interessante (daher der Name Interest-Operator) Merkmale in den Bildern extrahiert, um dann diese nicht über Attribute sondern mit einer Korrelation oder LSM zuzuordnen.

3.1.2.2 Zuordnung über Punkte

Es wurden zahlreiche Interest-Operatoren entwickelt, die hier nicht alle erwähnt werden sollen. Zu den bekanntesten zählen die Punktoperatoren von Moravec (Moravec 1977, 1980), Harris (Harris & Stephens 1988), Förstner (Förstner 1986, Förstner & Gülch 1987) und Dreschler (Dreschler 1981). Der Operator von Moravec untersucht die Grauwertdifferenzen in den vier Hauptrichtungen (senkrecht, waagrecht, diagonal) in Fenstern um den potenziellen Punkt (Autokorrelationsfunktion). Bei Überschreitung eines vorgegebenen Schwellwerts wird dieses Pixel als Merkmal angenommen. Er ist sehr leicht zu berechnen, ist aber nicht invariant gegenüber Drehungen. Eine Weiterentwicklung der Verwendung der diskreten Autokorrelationsfunktion des Moravec-Operators stellt der Harris-Operator dar, der die beiden Eigenwerte der Autokorrelationsmatrix zur Detektion von Eckpunkten untersucht. Dieser Operator reagiert unempfindlicher auf geometrische und radiometrische Transformationen und Rauschen als die ursprüngliche Version von Moravec. Ebenfalls aufbauend auf der Autokorrelationsmatrix selektiert der Förstner-Operator optimale Fenster (Support Region) zur Detektion von Eckpunkten oder Zentren von rotationssymmetrischen Figuren. Die Analyse in Frage kommender Fenster wird als Ausgleichung formuliert. In einem Schwellwertverfahren wird gefordert, dass zum Ausschluss von Kanten die Grauwertfehlerellipse möglichst rund und zur guten Lokalisierung möglichst klein sein soll. Dieser Operator ist robuster als die anderen bezüglich der Art der Merkmale und des Rauschens und bietet Subpixel-Genauigkeit. Dreschlers Operator basiert auf der Analyse und Bestimmung der Gaußschen Krümmung und der Hauptkrümmungsrichtungen. Es wird vorher explizit ein analytisches Modell über die zu detektierenden Punkte wie z. B. Ecken aufgestellt. An Nulldurchgängen der Gaußschen Krümmung wird ein Pixel als Merkmal klassifiziert. Dieser Operator ist durch die Verwendung der zweiten Ableitung bei der Berechnung der Krümmung rauschanfällig und auch sehr rechenintensiv. Einen praktischen Vergleich dieser Operatoren findet sich u. a. in (Luhmann & Altrogge 1986), (Lü 1988) und (Schmid et al. 2000). Insgesamt betrachtet ergeben sich sowohl aus praktischer als auch aus theoretischer Sicht Vorteile für den Förstner-Operator, so dass dieser in der Anwendung weit verbreitet ist.

In letzter Zeit wurden Punktdeskriptoren interessant, die affin- und skaleninvariant arbeiten. Diese Verfahren unterteilen sich prinzipiell immer in drei Schritte: Zunächst wird eine Support Region ausgewählt, in der dann ein Deskriptor aufgebaut wird. Im dritten Schritt erfolgt die eigentliche Zuordnung der Deskriptoren durch Distanzberechnung wie z. B. der Euklidischen Distanz (Nearest Neighbour), Mahalanobis-Distanz (Mahalanobis 1936) oder der Hausdorff-Distanz (Huttenlocher et al. 1993). Zur Auswahl der geeigneten Punkte kommen folgende Regionen zum Einsatz: Harris-Laplace (Detektion der Punkte durch skalenangepassten Harris-Operator und Auswahl der Punkte im Skalenraum über Laplacian-of-Gaussian Operator), Hessian-Laplace (Detektion über Hesse-Matrix, Auswahl über Laplacian-of-Gaussian), Harris-Affine (wie Harris-Laplace plus affine Anpassung über Momente zweiter Ordnung) und Hessian-Affine (wie Hessian-Laplace plus Momente zweiter Ordnung). Der Aufbau des Deskriptors erfolgt meistens über ein dreidimensionales Histogramm der Gradienten und ihrer Richtungen, aber auch andere Möglichkeiten wie z. B. invariante Momente wurden entwickelt. Eine Übersicht und Evaluierung dieser Methoden ist in (Mikolajczyk & Schmid 2005) beschrieben. Ein sehr leistungsfähiger lokaler Deskriptor ist die Scale Invariant Feature Transform (SIFT) (Lowe 2004). Die Detektion von geeigneten Punkten erfolgt prinzipiell über Hessian-Laplace Regionen, nur dass als Approximierung des Laplacian-of-Gaussian Operators der Difference-of-Gaussian Operator verwendet wird. In dem berechneten Maßstab wird in der Umgebung des Punktes ein Orientierungshistogramm mit 36 Richtungen aufgebaut, dessen höchster Wert die Hauptrichtung ergibt. Um Rotationsinvarianz zu erzielen, wird die Umgebung (16×16 Pixel) für das zu berechnende 3D-Histogramm mit dem Wert der Hauptrichtung normalisiert. Das Histogramm besteht aus 4×4 Bereichen mit jeweils 8 Richtungen, so dass sich ein Deskriptor mit 128 Werten ergibt. Die Zuordnung der Punkte erfolgt anschließend über die Euklidische Distanz. Mittlerweile gibt es Weiterentwicklungen, die die SIFT schneller (Bay et al. 2006) oder durch Hauptkomponentenanalyse robuster (Ke & Sukthankar 2004) implementieren.

Lokale Deskriptoren eignen sich vor allem für die relative Orientierung mit nur groben Näherungswerten bzw. stark konvergenter Aufnahmen (Läbe & Förstner 2005) oder zur Objekterkennung (Schmid & Mohr 1997). Es existiert auch eine Untersuchung zur Orientierung von schräg aus einem Helikopter aufgenommenen Luftbildern (Läbe & Förstner 2006), mit denen erfolgreich eine relative Orientierung durchgeführt werden konnte.

3.1.2.3 Zuordnung über Linien und Flächen

Außer Punkten können auch Linien oder Flächen zur Bildzuordnung verwendet werden. Durch die abstrakte symbolische Beschreibung ist auch die Zuordnung zu Modellen möglich. Die Linien (Kanten) werden mit einem geeigneten Operator wie Canny (Canny 1986) oder Laplacian-of-Gaussian (Marr & Hildreth 1980) bzw. durch Segmentierung (Pal & Pal 1993) bei Flächen in den Bildern extrahiert. Die symbolische Beschreibung erfolgt über geometrische Primitive wie z. B. eine Sequenz von Kantenlänge und Richtung, die dann mit geeigneten Verfahren der Distanzmessung wie z. B. Chamfer-Matching (Borgefors 1988) und Dynamic Programming zugeordnet werden. Prominente Vertreter dieser Verfahren sind u. a. (Baker & Binford 1982), (Ohta & Kanade 1987) und (Pollard et al.

1985). Diese Verfahren sind relativ robust gegenüber Rauschen, Verdeckungen, Mehrdeutigkeiten und Näherungswerten, die Punktverfahren liefern aber eine höhere Genauigkeit und Dichte.

3.1.2.4 Relationale Zuordnung

Die Relationale Zuordnung berücksichtigt zusätzlich noch die räumlichen Beziehungen der einzelnen Merkmale zueinander. Es werden Merkmale wie Kanten und Flächen extrahiert und identifiziert, denen Attribute (Länge, Richtung, Fläche, Form,...) zugewiesen werden. Dann werden die räumlichen Beziehungen untereinander analysiert und zugeordnet. Die Lösung kann dann über ein Relaxationsverfahren (Price 1985) oder über Graphen (Shapiro & Haralick 1987) bzw. Baumsuchalgorithmen gefunden werden. Die Vor- und Nachteile der Relationalen Zuordnung sind gegenüber den merkmalsbasierten Verfahren nochmals verstärkt: Es sind keine Näherungswerte notwendig, das Verfahren ist sehr robust bezüglich geometrischer Transformationen und Verzerrungen, Rauschen, Mehrdeutigkeiten etc. Die Genauigkeit ist gegenüber den anderen Verfahren allerdings geringer, so dass es sich zur Näherungswertbeschaffung eignet. Außerdem ist dieses Verfahren wegen der komplexen Graphen- bzw. Baumsuche sehr rechenintensiv. Eine umfassende Abhandlung zu diesem Thema befindet sich in (Vosselman 1992).

3.1.3 Kostenfunktionen

Um die Korrespondenz zweier Punkte zu messen, können Maße verwendet werden, bei denen entweder die Ähnlichkeit maximiert oder die Differenz minimiert werden muss. Die klassischen Maße sind die Squared Differences (SD) bei globalen bzw. Sum of Squared Differences (SSD) bei lokalen Methoden (L2-Norm), die z. B. auch beim LSM (vgl. 3.1.1.1) verwendet werden. Eine kleine Abwandlung davon sind die Absolute Differences (AD) bzw. Sum of Absolute Differences (SAD) (L1-Norm). Diese Maße sind einfach zu berechnen, sie sind allerdings nicht unempfindlich gegenüber radiometrischen Unterschieden. Daher werden diese Maße vor allem unter kontrollierten Bedingungen wie Stereomesssystemen eingesetzt, bei denen zwei oder mehr Bilder simultan mit gleichen Sensoren aufgenommen werden. Der Normalisierte Kreuzkorrelationskoeffizient (NCC) (Hannah, 1974) ist ein Ähnlichkeitsmaß, bei dem durch die Normalisierung radiometrische Unterschiede bezüglich Helligkeit und Kontrast kompensiert werden können:

$$\rho_{g_1, g_2} = \frac{\sigma_{g_1, g_2}}{\sqrt{\sigma_{g_1}^2 \cdot \sigma_{g_2}^2}} = \frac{\sum \sum (g_1 - \mu_1)(g_2 - \mu_2)}{\sqrt{\sum \sum (g_1 - \mu_1)^2 \cdot \sum \sum (g_2 - \mu_2)^2}} \quad (9)$$

Hierbei ist g_1 die Mustermatrix, g_2 die Suchmatrix und μ_1 und μ_2 der jeweilige Mittelwert des Fensters. Eine andere Möglichkeit, diese radiometrischen Unterschiede zu berücksichtigen, sind Histogrammanpassungen (Cox et al. 1995), gradientenbasierte Verfahren (Scharstein 1994) oder andere nichtlineare Bildtransformationen (Zabih & Woodfill 1994). Ein weiterer Ansatz basiert auf dem Vergleich von Filterantworten. Dabei werden die Fenster um die zuzuordnenden Punkte mit einer Reihe von linearen Filtern (Filterbank) gefaltet, und aus den Filterantworten wird eine Art Merkmalsvektor aufgebaut, der dann zugeordnet wird (Marr & Poggio 1979, Kass 1983, Jones & Malik 1992). Ein Ähnlichkeitsmaß der aktuellen Forschung ist Mutual Information (MI), das die statistische Abhängigkeit zweier Datensätze messen kann (Viola & Wells 1997, Maes et al. 1997). Hierbei erfolgt die Zuordnung über die Bestimmung der gegenseitigen Wahrscheinlichkeitsdichte (Joint Probability) zwischen zwei Bildern, was der Berechnung von Wahrscheinlichkeiten korrespondierender Intensitätswerte in einem Histogramm entspricht. Zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichte und der eigentlichen Maximierung der MI gibt es verschiedene Varianten. Aufgrund der Invarianz bezüglich globaler radiometrischer Unterschiede eignet sich dieses Maß insbesondere für die Registrierung multimodaler Aufnahmen wie sie in der Medizin vorkommen. Eine Übersicht und Vergleich der MI-Verfahren in der medizinischen Bildverarbeitung ist in (Pluim et al. 2003) zu finden. Die Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Kostenfunktionen bei radiometrischen Unterschieden in den Eingangsbildern insbesondere gegenüber MI ist in (Hirschmüller & Scharstein 2007) untersucht worden. Dabei hat sich MI bei globalen Methoden (s. 3.1.1.2) mit globalen radiometrischen Unterschieden als am besten geeignet erwiesen, nicht jedoch bei Methoden, die auf Korrelation basieren.

3.1.4 Strategie, Näherungswerte, weitere Probleme

Besonders bei großen Bildern wie Luftbildern mit teilweise mehreren hundert Millionen Pixeln wäre bei der Suche nach dem korrespondierendem Punkt ein Vergleich mit allen Pixeln des zweiten Bildes sehr ungeeignet. Neben der exponentiell ansteigenden Rechenzeit würde dieses Vorgehen unzählige mehrdeutige Ergebnisse liefern. Als Lösungsansatz bietet sich hier die Einschränkung des Suchraums und die Verwendung von einzigartigen Merkmalen an.

Je nach Anwendungsgebiet wird eine adäquate Strategie verwendet: Im Luftbildfall ist die Geometrie insbesondere nach Einzug von GPS und INS (Heipke et al. 2002) in die Praxis schon sehr genau bekannt, womit der Suchraum mit Epipolargeometrie und sehr genau bekannter Innerer und Äußerer Orientierung stark begrenzt werden kann. Im Nahbereich sind die geometrischen Verhältnisse oftmals weniger genau bekannt. Wegen der viel kleineren Bilder können hier robuste Verfahren wie z. B. SIFT (vgl. 3.1.2.2) angewandt werden. Häufig ist auch eine Kombination von robusten und hochgenauen Verfahren mit hoher Punktdichte sinnvoll: Zunächst werden mit merkmalsbasierten Methoden die erforderlichen Näherungswerte beschafft, und anschließend kann dann mit hochgenauen Verfahren ein dichtes Punktnetz erzeugt werden. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Suchraumverkleinerung, welche häufig in Kombination mit den anderen Verfahren angewandt wird, ist gemäß eines Bottom-Up Ansatzes das iterative Verfeinern der Lösung über Bildpyramiden (Ackermann & Hahn 1991). Das Originalbild wird hierbei zur Verhinderung von Aliaseffekten mit einem Gauß-Kernel gefiltert und um einen bestimmten Faktor (meistens 2) verkleinert.

Während bei der manuellen Messung homologer Punkte relativ wenige ausgesuchte Punkte gemessen werden, wird bei der automatischen Bestimmung die Redundanz erhöht, um den Einfluss einzelner Fehlzuordnungen zu mindern. Dazu werden im Verhältnis zur manuellen Messung sehr viele Punkte in mehr als zwei Bildern bestimmt. Im Datensatz können dann über mathematische Methoden wie z. B. robuste Ausgleichung (Werner 1984), RANSAC (Fischler & Bolles 1981) oder andere Verfahren (Meer et al. 1991) Fehler detektiert und beseitigt werden. Bei mehr als zwei Bildern stellt sich außerdem die Frage der Tupelgenerierung. Als eine einfache Methode bietet sich hier das Master-Slave Prinzip an, bei dem die Bilder paarweise einem Master-Bild (Referenzbild) zugeordnet werden. Es ergeben sich mit n Bildern insgesamt $n-1$ Bildpaare. Ein möglicher Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass dabei die Slave-Bilder als unabhängig voneinander betrachtet werden und die Relationen zwischen diesen nicht berücksichtigt werden. Als eine Erweiterung können die Bilder in allen Kombinationen zugeordnet werden, was bei n Bildern insgesamt $n(n-1)/2$ Bildpaare ergibt. Es besteht die Möglichkeit, als Ergebnis nur den Punkt mit dem höchsten Ähnlichkeitsmaß auszuwählen (Winner-Take-All), oder pro Bildpunkt des Master-Bildes werden mehr als ein Kandidat für den korrespondierenden Punkt im Slave-Bild zugelassen (z. B. alle Punkte im Suchraum, die einen Schwellwert überschreiten). Dieses Problem der Mehrdeutigkeit kann über die Modellierung des Tupels in einem Graphen gelöst werden. Jedes Tupel bildet einen Subgraphen, wobei die Knoten die Punkte und die Kanten die Zuordnungen darstellen. Die Lösung wird durch Minimierung der Kosten der Kanten gefunden, welche z. B. aus der Quadratsumme der Residuen einer Ausgleichung oder aus der Kostenfunktion abgeleitet werden können (Tsingas 1992, 1994). Nur bei der ersten Variante verfügt man zusätzlich über eine geometrische Kontrolle zur Konsistenzfindung. Eine weitere Möglichkeit ist die Konsistenzfindung mittels RANSAC (Brand & Heipke 1998), bei der ebenfalls die Geometrie berücksichtigt wird.

Neben den geometrischen und radiometrischen Unterschieden, Verdeckungen und geringer oder regelmäßiger Textur können bei der digitalen Bildzuordnung weitere Probleme auftreten. Dazu zählen u. a. sich langsam bewegende Objekte bei nicht simultan aufgenommenen Bildern wie z. B. Schatten in Luftbildern oder spiegelnde Oberflächen bei Gewässern. Auch transparente bzw. semi-transparente Oberflächen wie Flachwassergebiete oder Glasdächer stellen ein theoretisches Problem dar, das in der Praxis aber eher selten vorkommt. Derartige Bereiche sollten von der Bildzuordnung gemieden oder gegebenenfalls interpoliert werden.

3.1.5 Bisherige Arbeiten für Mars 96 und Mars Express

Da die HRSC bereits auf Mars 96 (s. 2.2.4) zum Einsatz kommen sollte, wurden schon in der Vorbereitungsphase der Mars Express-Mission einige Vorarbeiten zur Digitalen Bildzuordnung bzw. photogrammetrischen Prozessierung geleistet: In (Wiedemann et al. 1996) wird zur Verknüpfungspunktsuche ein Vorgehen basierend auf Bildpyramiden implementiert. Pro Bildstreifen werden im Master-Bild mittels Moravec-Operator Punktmerkmale extrahiert, die dann paarweise mit einer Kreuzkorrelation nach der Winner-Take-All Methode zugeordnet werden. Bei dem hochelliptischen Orbit ändert sich aufgrund der unterschiedlichen Flughöhen der Maßstab innerhalb des Streifens, so dass dieser in Partitionen unterteilt werden soll, die jeweils eigene Transformationsparameter besitzen. Zur Genauigkeitssteigerung und Verdichtung der Punkte wird anschließend ein LSM nach dem Region Growing-Verfahren (Otto & Chau 1989) angewandt. Das Verfahren wurde mit MEOSS (Lanzl 1986), MOMS-02/D2 (Seige & Meissner 1993) und Viking-Bilddaten erfolgreich getestet. Nach anschließender Bündelausgleichung (Ohlhof 1996) erfolgt nach einem ähnlichen Prinzip (s. nächster Absatz) die Bildzuordnung (Wewel 1996) zur DGM-Generierung (Uebbing 1996). Nach dem Scheitern dieser Mission konnten mit der HRSC-A viele Erfahrungen in der operationellen Prozessierung von Dreizeilen-Scanner Daten gesammelt werden (Scholten et al. 2002). Eine Verknüpfungspunktsuche mit anschließender Bündelausgleichung wurde vom DLR nicht durchgeführt, sondern es wurden die Messwerte aus der direkten Sensororientierung als Äußere Orientierung verwendet. In der Vorbereitungsphase des Projekts HRSC auf Mars Express wurde dennoch vom Autor testweise ein HRSC-A-Block erfolgreich mit einer Bündelausgleichung prozessiert (Schmidt & Brand 2003), wobei die Strahlenschnitte in den Subpixel-Bereich verbessert werden konnten.

Die Prozessierungskette für die Mars Express-Mission (Scholten et al. 2005) baut auf den Arbeiten zur HRSC-A auf. Die Bilddaten werden ähnlich wie in dieser Arbeit mit dem MOLA-DGM vorentzerrt, in denen die Digitale Bildzuordnung zur DGM-Generierung nach dem Verfahren von (Wewel 1996) erfolgt. Basierend auf Bildpyramiden werden die in einem Gitter angeordneten Punkte mit einer paarweisen Zuordnung über Kreuzkorrelation zugeordnet. Anschließend wird die Genauigkeit der Punkte mit einem LSM-Verfahren gesteigert. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens ist leider nicht dokumentiert.

3.2 Bildrekonstruktion

Aufgrund der limitierten Bandbreite zur Datenübertragung zwischen Erde und Mars können nicht die gesamten HRSC-Daten in voller Auflösung zur Erde übertragen werden. Neben der in 2.3.3.3 beschriebenen Makropixelbildung werden die Bilder zusätzlich mit einem auf der Diskreten Kosinustransformation (DCT) basierenden Verfahren verlustbehaftet komprimiert, wie es vom JPEG-Algorithmus bekannt ist. Je nach Stärke der Kompression können dabei Artefakte in den Bildern entstehen, die die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der digitalen Bildzuordnung beeinträchtigen können (Parkes et al. 1991, Heipke 1995, Kiefner 2001). Außer den Kompressionsartefakten mindert vor allem Rauschen die Bildqualität und somit die Bildzuordnung. Um eine gleichmäßigere Punktabdeckung und stabilere Zuordnung zu erreichen, werden die HRSC-Bilder vor der eigentlichen Prozessierung gefiltert, so dass sowohl das Rauschen als auch die Kompressionsartefakte beseitigt bzw. gemindert werden. In diesem Abschnitt wird die DCT und ein Algorithmus zur Reduzierung der Blockartefakte vorgestellt. Danach werden die beiden Verfahren Anisotrope Diffusion und Non-Local Means (NL Means) zur Rauschunterdrückung beschrieben.

3.2.1 Der DCT-Algorithmus

Die in den Data Compression Electronics (DCE) der HRSC implementierte Methode zur verlustbehafteten Kompression basiert auf der DCT (Ahmed et al. 1974). Durch die DCT wird ein Teilblock des Bildes zunächst in eine Reihe von Koeffizienten umgerechnet. Die eigentliche Kompression erfolgt durch Quantisierung bzw. Nullsetzen nicht signifikanter Koeffizienten, die folglich als Reihe von Nullen effektiv mit einer Entropiekodierung verlustfrei komprimiert übertragen werden können. Im Detail wird die Kompression folgendermaßen erzielt: Das Bild wird in 8×8 Pixel große Teilblöcke (andere Größen sind möglich) unterteilt, die unabhängig voneinander prozessiert werden. Durch die DCT werden die Pixel des Teilblocks in 64 Koeffizienten umgerechnet:

$$F_{x,y} = \frac{2 \cdot C(x) \cdot C(y)}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f_{i,j} \cdot \cos\left(\frac{(2i+1) \cdot x \cdot \pi}{2 \cdot N}\right) \cdot \cos\left(\frac{(2j+1) \cdot y \cdot \pi}{2 \cdot N}\right) \quad (10)$$

mit $f_{i,j}$ Pixel des Eingangsblocks

$F_{x,y}$ DCT-Koeffizienten

N Blockgröße, meistens 8

$C(x), C(y)$ Konstanten, $C(n) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & n=0 \\ 1, & n \neq 0 \end{cases}$

Die berechneten Koeffizienten sind Basisfunktionen von Kosinuswellen unterschiedlicher Frequenzen, die nach einem Muster in der Ergebnismatrix angeordnet sind. In der linken oberen Ecke befindet sich der Koeffizient mit der höchsten Energie und repräsentiert den Mittelwert des betrachteten Blocks. Von links nach rechts nimmt die Frequenz der Kosinuswellen in horizontaler Richtung zu, während von oben nach unten die Frequenz in vertikaler Richtung zunimmt. Ein Bild mit einem hohen Anteil an feinen Strukturen erhält nach der Transformation hohe Amplituden bei den Koeffizienten hoher Frequenzen. Werden die Koeffizienten mit genügend hoher Genauigkeit abgespeichert, so ist die Rücktransformation über die Inverse Diskrete Kosinustransformation (IDCT) verlustfrei:

$$f_{i,j} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \frac{2 \cdot C(x) \cdot C(y)}{N} \cdot F_{x,y} \cdot \cos\left(\frac{(2i+1) \cdot x \cdot \pi}{2 \cdot N}\right) \cdot \cos\left(\frac{(2j+1) \cdot y \cdot \pi}{2 \cdot N}\right) \quad (11)$$

Um die eigentliche Datenreduktion zu erzielen, wird nun jeder DCT-Koeffizient durch einen bestimmten Faktor dividiert und auf die nächstliegende Ganzzahl gerundet. Neben einem konstanten Faktor kann für jeden einzelnen Koeffizienten ein eigener Wert gewählt werden, was zu einer Quantisierungsmatrix $Q_{x,y}$ führt:

$$F_{x,y}^Q = \left\lfloor \frac{F_{x,y}}{Q_{x,y}} \right\rfloor \quad (12)$$

Mit der Quantisierungsmatrix wird sowohl die Qualität als auch die Kompressionsrate beeinflusst und sollte daher auf die Empfindlichkeit des menschlichen Auges für die entsprechenden Ortsfrequenzen abgestimmt sein. Diese Quantisierung führt zu einer Reduzierung der Amplitudenauflösung und des Dynamikbereichs der einzelnen Koeffizienten, wobei je nach Bildinhalt bzw. Anteil der Ortsfrequenzen viele Koeffizienten insbesondere bei den hohen Frequenzen zu Null werden (Irrelevanzreduktion) (Reininger & Gibson 1983). Mit einer Lauflängenkodierung können diese vielen identischen Koeffizienten effektiv kodiert bzw. komprimiert werden. Die durch die Quantisierung reduzierte Rechenschärfe führt allerdings dazu, dass die Originalgrauwerte nicht wieder über die IDCT berechnet werden können. Dies macht sich im komprimierten Bild mit einem Verlust an Detailschärfe und der Entstehung von Artefakten bemerkbar: Da die DCT auf kleine unabhängige Teilblöcke der Größe 8×8 Pixel angewandt wird, entstehen an deren Rändern Kanten, die je nach eingestellter Kompressionsstufe und Bildinhalt mehr oder weniger deutlich als Blockstruktur zu erkennen sind. Als ein weiteres Kompressionsartefakt kann das Gibbsche Phänomen (Ringing) auftreten (Gibbs 1898, 1899). In der Umgebung von Unstetigkeitsstellen (Kanten im Bild) entstehen bei Fourierreihen durch Über- und Unterschwingen neue Grauwerte, die am Objekt nicht vorhanden sind. Bei Mars Express ist diese Erscheinung nicht beobachtet worden bzw. tritt nicht deutlich genug hervor. Der schematische Ablauf der JPEG-Komprimierung wird auch in (Wallace 1991) beschrieben. Bei der Bildkompression nach dem JPEG-Standard werden allerdings noch zusätzliche Rechenschritte wie Farbraumkonvertierung, Tiefpassfilterung der Farbdifferenzsignale und Entropiekodierung durchgeführt (Pennebaker & Mitchell 1993).

3.2.2 Algorithmus zur Reduzierung der Blockartefakte

Es existieren zahlreiche Methoden, um die aufgrund des Informationsverlustes entstandenen Blockartefakte zu beseitigen und das Bild zu rekonstruieren (Shen & Kuo 1998). Die meisten Algorithmen setzen dabei bestimmte Glattheitsbedingungen für das Bild an (Reeve & Lim 1983, Youla 1978, Yang et al. 1993, Alter et al. 2005). In (Datcu et al. 1995) wurde ein solches Verfahren untersucht, mit dem die Daten der Mars 96-Mission (s. 2.2.4) bearbeitet werden sollten. Ein anderer sehr effektiver Ansatz wurde in (Nosratinia 2001) entwickelt und soll hier zur Rekonstruktion der HRSC-Bilder verwendet werden. Der Algorithmus arbeitet nach folgendem Schema:

1. Verschiebe das Bild in horizontaler und vertikaler Richtung um einen bestimmten Betrag (x, y) .
2. Wende die DCT basierte Kompression (DCT, Quantisierung, IDCT) auf das verschobene Bild an.
3. Verschiebe das Ergebnis um den selben Betrag zurück $(-x, -y)$.
4. Wiederhole den Vorgang für alle 64 möglichen Verschiebungen im Bereich $[-3, 4] \times [-3, 4]$.
5. Middle alle Ergebnisbilder.

Bei der DCT werden durch die Quantisierung innerhalb des Blocks hohe Frequenzen gefiltert und gleichzeitig hohe Frequenzen am Blockrand generiert, die die Artefakte bilden. Die Grundidee ist nun, dass die verschobenen Bilder die Blockgrenzen der Quantisierung aussetzen und somit die Artefakte gefiltert werden. Die neu hinzugefügten Artefakte sind wesentlich geringer, da die Quantisierung in bereits „gefilterten“ Bereichen wirkt. Es wird keine Richtung bevorzugt, so dass alle in Frage kommenden Verschiebungen berechnet und anschließend gemittelt werden. Durch die Mittelung werden die Blockartefakte erfolgreich gemindert bzw. beseitigt. Als Quantisierungsmatrix wird dieselbe wie beim Ausgangsbild verwendet, welche in der Regel zur Verfügung steht. Das Randproblem wird dadurch gelöst, dass das Bild durch Replikation der äußeren Spalte bzw. Zeile erweitert wird. Zur Beschleunigung der Rechnung ist es möglich, nicht alle 64 Varianten zu berechnen, sondern sich auf z. B. 16 symmetrisch angeordnete Verschiebungen zu beschränken.

3.2.3 Anisotrope Diffusion

Die Anisotrope Diffusion kann zur Kantendetektion und zur Bildsegmentierung verwendet werden. In dieser Arbeit wird sie zur kantenerhaltenden Filterung der verrauschten HRSC-Bilder angewandt. Eingeführt wurde die Anisotrope Diffusion von (Perona & Malik 1990), deren Ausgangspunkt der lineare Skalenraum von (Witkin 1983)* war. Der lineare Skalenraum wird für zweidimensionale Signale (Bilder) berechnet, indem ein Ausgangsbild $I_0(x, y)$ mit einem Gauß-Filter $G(x, y, t)$ der Varianz $t = \sigma^2$ gefaltet wird:

$$G(x, y, t) = \frac{1}{2\pi t} e^{-\frac{x^2+y^2}{2t}} \quad (13)$$

mit x, y Position im Bild
 t künstlicher Zeitparameter

Der Gauß-Kernel ist der Filter zur Erzeugung des linearen Skalenraums (Koenderink 1984, Babaud et al. 1986, Lindeberg 1994). Als Ergebnis erhält man für den linearen Skalenraum eine Familie von geglätteten Signalen $I(x, y, t)$, die einer gröberer Auflösung entsprechen:

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) * G(x, y, t) \quad (14)$$

In (Koenderink 1984) wird beschrieben, dass dieser Skalenraum equivalent zur Lösung des linearen Diffusionsprozesses (Wärmeleitungsgleichung) ist:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \nabla^2 I = (I_{xx} + I_{yy}), \quad (15)$$

mit der Ausgangssituation $I(x, y, t_0) = I_0(x, y)$ und dem Nabla-Operator $\nabla \left(\nabla^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$.

Schüttet man heißes Wasser in einen Behälter mit kaltem Wasser, wird die Temperatur im Behälter ansteigen, und das heiße Wasser wird sich nach einer gewissen Zeit gleichmäßig verteilt haben. Der Behälter kann hier als das Bild, das Wasser als die Gesamtheit der Pixel und die Temperatur als die Grauwerte der einzelnen Pixel betrachtet werden. Bei dieser isotropen Diffusion kann Wärme in einem homogenen Medium gleichmäßig in alle Richtungen dissipieren. In (Koenderink 1984) werden für den Diffusionsprozess zwei Hypothesen aufgestellt:

Kausalität: Jedes Merkmal in einer Ebene gröberer Auflösung muss einen (nicht notwendigerweise einzigartigen) Ursprung in einer Ebene mit feinerer Auflösung besitzen, wobei die Umkehrung nicht unbedingt erfüllt sein muss. Diese Bedingung verhindert die Generierung von Merkmalen aus dem Nichts in Ebenen gröberer Auflösung.

Homogenität und Isotropie: Der Skalenraum hängt nur vom Parameter t und nicht von x oder y ab, d. h. die Filterung soll ortsinvariant sein.

Ein großer Nachteil der zweiten Hypothese ist, dass durch die Gauß-Filterung Kanten unscharf (diffus), räumlich versetzt oder sogar eliminiert werden können, wobei Kanten hier als Begrenzungen von semantisch sinnvollen Regionen betrachtet werden. Diese Phänomene sind in Abb. 18 für ein eindimensionales Signal wie z. B. eine Bildzeile dargestellt. In horizontaler Richtung ist die Position der Kante und in vertikaler Richtung die Position entlang des linearen Skalenraums aufgetragen.

Um die Nachteile zu umgehen, wurde in (Perona & Malik 1990) die zweite Hypothese durch zwei neue Kriterien ersetzt:

Unmittelbare Lokalisierbarkeit: Auf jeder Auflösungsstufe sollen die Gebietsgrenzen (Kanten) sowohl scharf sein als auch semantisch mit den tatsächlichen Grenzen übereinstimmen.

* Unabhängig von Witkin wurde der lineare Skalenraum bereits 1959 in Japan beschrieben (Weickert et al. 1999).

Stückweise Glättung: Auf jeder Auflösungsstufe soll die Glättung eher innerhalb der einzelnen Regionen und nicht untereinander stattfinden.



Abb. 18: Position der Kanten (Nulldurchgänge des Laplace-Filters) entlang des linearen Skalenraums, Quelle: (Witkin 1983)

Bei der isotropen Diffusion ist der Diffusionskoeffizient c (s. Gl. 16) eine Konstante, die unabhängig von Ort und Richtung ist. In (Perona & Malik 1990) wurde ein räumlich variierender anisotroper Diffusionskoeffizient $c(x, y, t)$ eingeführt, bei dem die Wärme nicht gleichmäßig in alle Richtungen dissipieren kann:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \nabla I) = c(x, y, t) \nabla^2 I + \nabla c \cdot \nabla I \quad (16)$$

mit div Divergenz-Operator
 $c(x, y, t)$ Diffusionskoeffizient

Die anisotrope Diffusion wird mit folgender Formel mit einer Vierer-Nachbarschaft diskretisiert, obgleich auch andere Nachbarschaften (Barash 2005) denkbar sind:

$$I_{i,j}^{t+1} = I_{i,j}^t + \lambda (c_N \cdot \nabla_N I + c_S \cdot \nabla_S I + c_E \cdot \nabla_E I + c_W \cdot \nabla_W I) \quad (17)$$

mit $I_{i,j}^{t+1}$ neuer Grauwert an der Stelle i, j
 $I_{i,j}^t$ aktueller Grauwert
 λ Gewichtungsfaktor (0,25 bei einer Vierer-Nachbarschaft)
 c_X gerichteter Diffusionskoeffizient, Index X zeigt die Richtung an (Norden, Süden, Osten, Westen),
 Funktion des gerichteten Grauwertgradienten
 $\nabla_X I$ gerichteter Grauwertgradient

Die gerichteten Grauwertgradienten werden folgendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned} \nabla_N I_{i,j} &\equiv I_{i-1,j} - I_{i,j} \\ \nabla_S I_{i,j} &\equiv I_{i+1,j} - I_{i,j} \\ \nabla_E I_{i,j} &\equiv I_{i,j+1} - I_{i,j} \\ \nabla_W I_{i,j} &\equiv I_{i,j-1} - I_{i,j} \end{aligned} \quad (18)$$

Der Ort der Kante ist nicht bekannt, als eine einfache Schätzung werden die gerichteten Grauwertgradienten verwendet. Für $c_x = g(\nabla_x I)$ werden in (Perona & Malik 1990) zwei Funktionen („edge-stopping functions“) angegeben:

Exponentielle Form:

$$g_e(\nabla I) = e^{-\left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2} \quad (19)$$

Inverse Form:

$$g_i(\nabla I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2}, \quad (20)$$

wobei K die Stärke der zu erhaltenden Kanten und den Grad der Diffusion steuert. Mit niedrigen Werten von K können kleine Gradienten die Diffusion mindern, während hohe Werte eine Diffusion in Bereichen mit relativ großen Gradienten erlauben. Die Exponentielle Form bevorzugt Kanten mit hohem Kontrast gegenüber Kanten mit niedrigem Kontrast, und die Inverse Form bevorzugt große Flächen gegenüber kleineren. In (Perona & Malik 1990) wird gezeigt, dass mit einem ortsvarianten Diffusionskoeffizienten Kanten nicht nur erhalten sondern sogar geschärft werden können.

Die Anisotrope Diffusion wurde in zahlreichen Veröffentlichungen auf ihre mathematischen Eigenschaften und Verbindungen zu anderen Bildrekonstruktionsverfahren untersucht, es wurden andere edge-stopping Funktionen erforscht, und Modifikationen für schnelle Implementierungen oder spezielle Anwendungen wurden entwickelt. Einen Überblick über Literatur zur Anisotropen Diffusion findet sich z.B. in (Acton 2000) und (Black et al. 1998). In letzterem wird die Verbindung zwischen Anisotroper Diffusion und Robuster Statistik dargelegt. Es wird gezeigt, dass die edge-stopping Funktion mit Fehlernorm und Einflussfunktion (Hampel et al. 1986) eines robusten Schätzprozesses zusammenhängt. Dies erlaubt eine Untersuchung der Charakteristik dieser Funktionen und die Ableitung neuer Funktionen.

Das Bild wird als eine stückweise glatte Funktion betrachtet, die mit additivem weißen Gaußschen Rauschen überlagert ist. In einer dieser stückweise glatten Regionen sind die Differenzen $\nabla_x I$ klein, normalverteilt und haben den Erwartungswert 0. Ein optimaler Schätzer für den wahren Wert der Grauwertfunktion minimiert die Quadrate der Differenzen $\nabla_x I$, was durch eine Mittelung der Nachbargrauwerte erreicht wird. Wenn die betrachtete Region allerdings eine Kante enthält, sind die Differenzen nicht mehr normalverteilt. In diesem Fall kann die entsprechende Differenz als Ausreißer bezüglich der Gaußschen Normalverteilung betrachtet werden. Solche Ausreißer können mit einer geeigneten robusten Fehlernorm detektiert und somit Kanten erhalten werden. In (Black et al. 1998) wird gezeigt, dass Perona & Maliks Exponentielle Form (19) auf der Fehlernorm nach Leclerc (Leclerc 1989) basiert, während die Inverse Form (20) auf der Fehlernorm nach Lorentz (Cauchy-Verteilung) basiert. Als geeignetere Fehlernorm wird die nach Tukey (Beaton & Tukey 1974) vorgeschlagen, da diese Ausreißer nicht nur mindert sondern gänzlich unterdrückt:

$$g(\nabla I, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{2} [1 - (\nabla I / \sigma)^2]^2, & \|\nabla I\| \leq \sigma \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (21)$$

Mit dem Wert σ wird gesteuert, wie groß der Gradient werden darf, bevor er als Ausreißer klassifiziert wird. Dieser Wert kann auch automatisch über z. B. folgende Formel bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \sigma_g &= 1,4826 \text{MAD}(\nabla I) \\ &= 1,4826 \text{median}_I [|\|\nabla I - \text{median}_I(\|\nabla I\|)|] \end{aligned} \quad (22)$$

MAD ist die Abkürzung für Median Absolute Deviation (Mittlere Abweichung vom Median) (Hampel 1974), wobei der MAD einer Standardnormalverteilung die Varianz $0,6745 = 1/1,4826$ besitzt. Der Index I bzw. g bei σ deutet an, dass der Median über das gesamte Bild berechnet werden muss. Da HRSC-Bilder sehr groß werden können, wurde die Berechnung des globalen σ_g über den Remedian (Rousseeuw & Bassett 1990) vorgenommen. Dabei wird der Median zunächst für jede Bildzeile separat berechnet und der endgültige Wert wird aus dem Ergebnisvektor ermittelt.

In Abb. 19 sind die drei vorgestellten edge-stopping Funktionen dargestellt. Bei der Inversen Form von Perona & Malik ist zu beobachten, dass selbst bei großen Gradienten noch eine Diffusion stattfindet. Auch die Exponentielle Form von Perona & Malik nähert sich der Null asymptotisch, wenn auch die Diffusion bei höheren Gradienten stärker reduziert wird. Erst mit der Robusten Form wird die Diffusion ab dem eingestellten Gradienten wirklich gestoppt, so dass Kanten oberhalb dieses Gradienten vollständig erhalten bleiben.

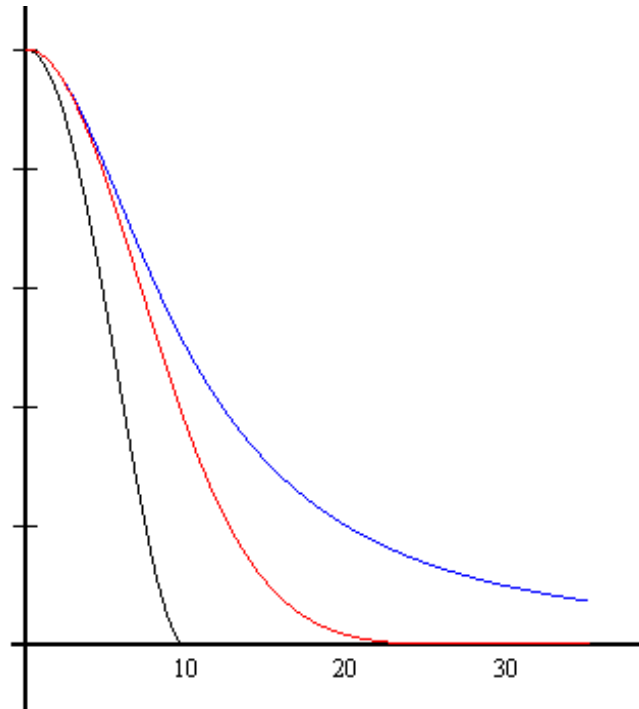


Abb. 19: Plot der drei vorgestellten edge-stopping Funktionen (von links nach rechts): Robust: $\sigma=10$, Perona-Malik Exponentiell: $K=10$, Perona-Malik Invers: $K=10$

Es kann allerdings ein Problem darstellen, wenn vereinzelte isolierte Störpixel eine eher Salz & Pfeffer-Rauschen-Charakteristik aufweisen (s. Abb. 20). Diese können wegen ihrer großen Gradienten zur Umgebung möglicherweise nicht von Kanten unterschieden werden. Aus diesem Grund wurde zusätzlich noch ein Filter implementiert, der nach jeder Iteration solche Pixel unterdrückt (You & Kaveh 2000). Hierbei werden der Mittelwert m und die Varianz σ (23) der vier Nachbarpixel um $I_{i,j}$ berechnet. Wenn σ klein und die Differenz $I_{i,j} - m \gg \sigma$ ist, wird dieses Pixel ersetzt (24):

$$m = \frac{I_{i,j-1} + I_{i,j+1} + I_{i-1,j} + I_{i+1,j}}{4}, \quad \sigma^2 = \frac{I_{i,j-1}^2 + I_{i,j+1}^2 + I_{i-1,j}^2 + I_{i+1,j}^2}{4} - m^2 \quad (23)$$

$$\text{mit } I_{i,j} = \begin{cases} m & , (I_{i,j} - m)^2 > 3\sigma^2 \\ I_{i,j} & , \text{sonst} \end{cases} \quad (24)$$

Im Prinzip sind noch Erweiterungen zu der Anisotropen Diffusion möglich. Das σ_g aus Formel (22) kann auch örtlich variieren (Black & Sapiro 1999). Dazu wird es nicht über das gesamte Bild sondern in kleinen Fenstern von z. B. 15×15 Pixeln berechnet. Dies bedeutet, dass σ von der lokalen Textur abhängt, was in einer stärkeren Diffusion in Gebieten mit stärkerer (höherer) Textur resultiert. Dies ist allerdings nur sinnvoll, wenn in solchen Gebieten lediglich Kanten mit größerer Kantenstärke detektiert werden sollen. Im Fall von HRSC wird das Rauschen über das gesamte Bild als konstant angenommen, so dass ein lokal variierendes σ nicht zweckmäßig ist. Außerdem steigt die Rechenzeit für die Filterung eines großen HRSC-Bildes mit einem lokal variierendem σ deutlich an, so dass eine operationelle Prozessierung gegenwärtig nicht bzw. nur mit Großrechnern möglich wäre. Neben dem σ_g muss auch die Anzahl der Iterationen festgelegt werden. Ein automatischer Ansatz wird in (Mrázek & Navara 2003) vorgestellt, für die

Prozessierung der HRSC-Bilder wird aber manuell ein Erfahrungswert von drei bis fünf Iterationen eingestellt. Als ein Nebeneffekt bei der Anisotropen Diffusion kann mit steigender Iterationenzahl manchmal auch beobachtet werden, dass Pixel sich zu Gebieten gleichen Grauwerts ähnlich wie Segmentierungsflächen zusammenschließen. Ein Lösungsansatz ist die Nichtlineare Diffusion höherer Ordnung (You & Kaveh 2000, Didas et al. 2005).



Abb. 20: Diffusion links ohne und rechts mit Filter nach Formeln (23) und (24)

3.2.4 Non-Local Means

Der Non-Local Means (NL Means) Algorithmus (Buades et al. 2005) macht keine Annahmen über die im Bild enthaltenen Kanten bzw. Frequenzen wie z. B. die Anisotrope Diffusion. Stattdessen wird angenommen, dass ein Bild viel Redundanz enthält. Damit ist gemeint, dass jeder kleine Ausschnitt aus einem Bild viele ähnliche Ausschnitte im selben Bild besitzt (Prinzip der Selbstähnlichkeit). Bei einem Gauß-Filter wird im Prinzip die gleiche Annahme getroffen. Bei diesem lokalen Filter wird über eine 3×3 oder größere Nachbarschaft gewichtet gemittelt. Beim NL Means-Algorithmus wird dieses Konzept der gewichteten Mittelung über eine lokale Nachbarschaft auf das gesamte Bild erweitert:

$$NL(v)(x) = \sum_{y \in I} w(x, y) v(y) \quad (25)$$

mit	$v = \{v(x) \mid x \in I\}$	diskretes Bild mit Rauschen
	$NL(v)(x)$	Ergebniswert
	$w(x, y)$	Gewichte, abhängig von der Ähnlichkeit der Pixel x und y
		mit $0 \leq w(x, y) \leq 1$ und $\sum_y w(x, y) = 1$

Um die Ähnlichkeit zwischen den beiden Pixeln zu berechnen, wird um das zu berechnende Pixel eine Fenster definiert, welches mit anderen Fenstern im Bild verglichen wird. Für dieses Ähnlichkeitsfenster wird normalerweise eine Größe von 7×7 oder 9×9 Pixeln verwendet. Theoretisch wird dabei das gesamte Bild betrachtet, praktisch wird der Suchraum aber auf die nähere Umgebung von üblicherweise 15×15 bis 19×19 Pixeln des zu berechnenden Pixels beschränkt. Pixelpaare mit einer größeren Ähnlichkeit bekommen ein höheres Gewicht als Paare mit nur einer geringen Ähnlichkeit. Das Prinzip der Gewichtung je nach Ähnlichkeit der Bildausschnitte ist in Abb. 21 zu sehen:

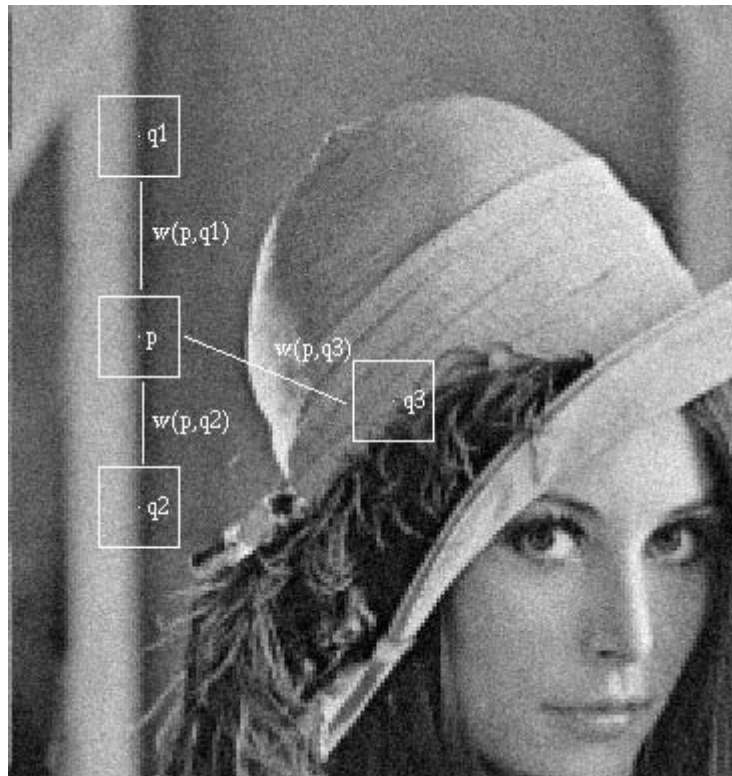


Abb. 21: Pixel q1 und q2 bekommen im Gegensatz zu q3 ein hohes Gewicht, da sie bezüglich ihrer Nachbarschaft eine größere Ähnlichkeit zu p aufweisen, Quelle: (Buades et al. 2005)

In diesem Beispiel bekommen die Pixel q1 und q2 ein hohes Gewicht, da sie zum Ausgangspixel p eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Das Pixel q3 bekommt ein deutlich geringeres Gewicht, da es gemessen an seiner Nachbarschaft eine geringere Ähnlichkeit zu q aufweist. Die Ähnlichkeit zweier Bildausschnitte wird über die Euklidische Distanz berechnet, die mit einer Gauß-Funktion gewichtet wird. Dabei bekommen Pixel am Rand des Fensters ein geringeres Gewicht als das Zentralpixel. Der Algorithmus läuft für jedes Pixel x folgendermaßen ab:

- Definiere den Suchbereich $A(x,t)$ um Pixel x der Größe $2t+1 \times 2t+1$, mit z. B. $t=7$ oder 9
- Definiere das Ähnlichkeitsfenster $W(x,f)$ um Pixel x der Größe $2f+1 \times 2f+1$, mit z. B. $f=3$ oder 4
- Für jedes Pixel y in $A(x,t)$ (ohne Position x) mache Folgendes:
 - Berechne gewichtete Differenz $d(x,y)$ aus $W(x,f)$ und $W(y,f)$
 - Berechne das Gewicht $w(x,y) = \exp(-d(x,y)/h)$, der Parameter h steuert den Grad der Filterung und sollte den 10- bis 15-fachen Wert der Standardabweichung des Rauschens betragen
- Berechne die Summe aus den Gewichten $w(x,y)$ und den Grauwerten $u(y)$ im Fenster $A(x,t)$: $\sum w(x,y) * u(y)$
- Berechne die Gesamtsumme der Gewichte $\sum w(x,y)$
- Berechne den endgültigen Grauwert $NL(v)(x) = \sum w(x,y) * u(y) / \sum w(x,y)$

4 Bestimmung von Verknüpfungspunkten

In diesem Kapitel wird zunächst anhand der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Methoden zur Digitalen Bildzuordnung das Verfahren zur automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern entwickelt. Im zweiten Abschnitt wird der allgemeine Ablauf bei der automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten dargestellt. Im dritten Abschnitt wird dann das eigentliche Zuordnungsverfahren genauer vorgestellt. In Abschnitt 4.4 wird kurz das Prinzip der Bündelausgleichung aus (Spiegel 2007) erläutert, die zur Evaluierung der in Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse verwendet wird. Die Einordnung des Verfahrens in die Gesamtprozessierungskette der HRSC-Daten bis zum fertigen Produkt ist in Abb. 22 dargestellt. Die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist in der Abbildung hervorgehoben.

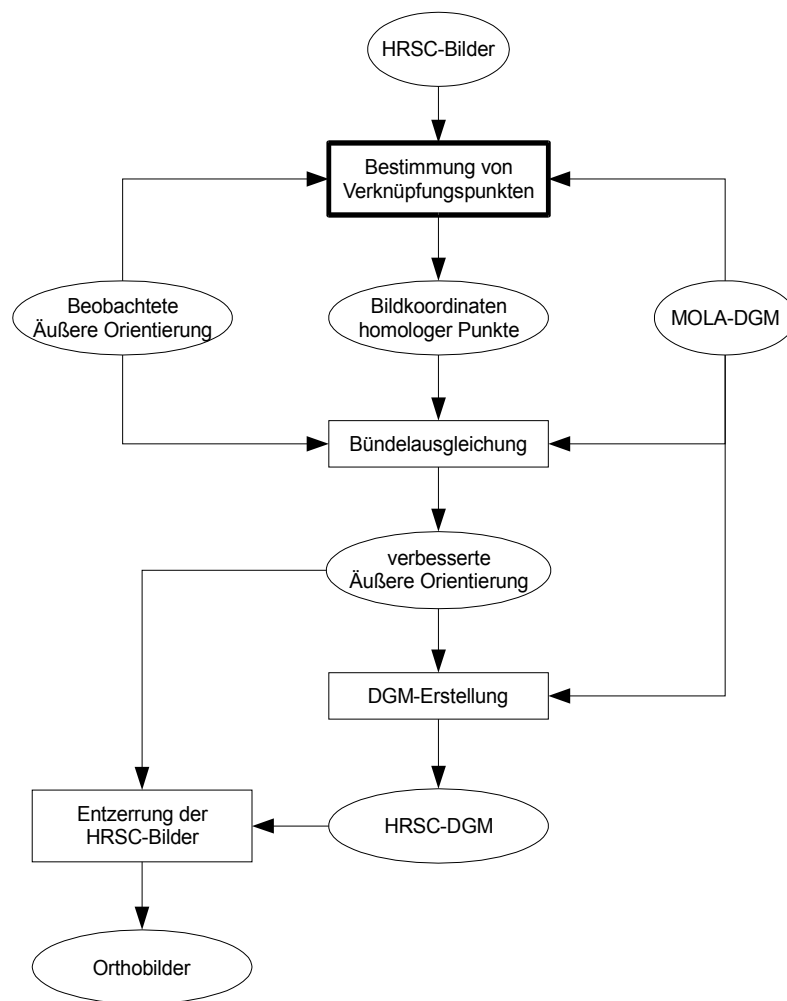


Abb. 22: Gesamtprozessierungskette der HRSC-Daten

4.1 Bestimmung des Verfahrens

Die ersten planetaren Missionen liegen einige Jahrzehnte zurück, und damals lagen lediglich vom Monitor abfotografierte analoge Bilder vor. Außerdem waren die Missionen vor Mars Express nicht speziell für stereoskopische Auswertungen geplant, so dass im Rahmen des HRSC-Projektes das erste Mal eine systematische photogrammetrische Auswertung möglich ist (Jaumann et al. 2007). Anhand der in 3.1 vorgestellten Verfahren zur digitalen Bildzuordnung soll nun erörtert werden, welche Strategie und Methode zur Lösung der gestellten Aufgabe, nämlich der flächendeckenden automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern, sinnvoll ist.

Seit den Vorbereitungen für das Mars 96-Projekt vor über einem Jahrzehnt sind die Verfahren für die Bildzuordnung weiterentwickelt worden, die auch bei den Überlegungen zur Bestimmung des Zuordnungsverfahrens bzw. der Prozessierungskette zur automatischen Bestimmung der Verknüpfungspunkte berücksichtigt werden. In den folgenden Unterabschnitten wird unter Berücksichtigung HRSC-spezifischer Eigenschaften bezüglich Geometrie, Radiometrie, Textur, Bildqualität und der Anforderungen der Bündelausgleichung nach flächendeckenden hochgenauen Punkten das Verfahren entwickelt.

4.1.1 Lokale oder globale Zuordnung

Zunächst soll eine Entscheidung getroffen werden, ob ein lokales oder ein globales Verfahren zur Bestimmung der Verknüpfungspunkte verwendet werden soll. Die globalen Verfahren liefern ein dichtes (für jedes Pixel) Netz von Punkten, die dafür gute Näherungswerte benötigen. In der Prozessierungsstufe vor der Bündelausgleichung soll noch kein DGM abgeleitet werden (s. Abb. 22), so dass die geforderte Punktdichte nicht so hoch wie bei der DGM-Erzeugung zu sein braucht. Es wird daher ein lokales Verfahren mit Korrelationsfenstern implementiert. Die in 3.1.1.1 erwähnten Schwierigkeiten an Disparitätssprüngen und Verdeckungen sind bei den HRSC-Bilddaten bei der Erzeugung von Verknüpfungspunkten für eine Bündelausgleichung nicht kritisch, da auf der Oberfläche des Mars keine dichte Bebauung o.Ä. vorhanden ist. Dennoch können abrupte Höhengsprünge z.B. an Bruchkanten von Grabensystemen auftreten, an denen die Korrelation mit großen Fenstern problematisch sein könnte. Es stellt für die anschließende Bündelausgleichung allerdings keine Einschränkung dar, wenn an solchen Stellen keine Punkte gefunden werden. Bei der Analyse der eingereichten Ergebnisse des HRSC DGM-Tests (Heipke et al. 2007) hat sich im Übrigen ergeben, dass ein globales Verfahren mit einer Straffunktion für abrupte Höhenänderungen (Hirschmüller et al. 2006), die in urbanen Gebieten für hervorragende Ergebnisse sorgt (Hirschmüller 2008), oftmals zu einer unnatürlichen Topographiemodellierung führt. Auch Verdeckungen treten bei den HRSC-Daten praktisch nicht auf, dennoch wurde eine bidirektionale Konsistenzprüfung (Hannah 1989, Fua 1991, 1993) implementiert, die bei Bedarf aktiviert werden kann.

4.1.2 Flächen- oder merkmalsbasierte Zuordnung

Da die Aufnahmegeometrie bekannt ist und die relative Genauigkeit der Bilder eines Streifens zueinander hinreichend gut ist, kann auf die Zuordnung mit linienhaften oder flächenhaften Merkmalen verzichtet werden. Diese Verfahren alleine würden auch keine ausreichend hohe Punktdichte erzielen. Ein Problem bei der Bildzuordnung von planetaren Bilddaten sind die häufig vorkommenden texturarmen Bereiche, so dass es sinnvoll wäre, mittels eines Interest-Operators geeignete Fenster mit ausreichend Textur auszuwählen. Das Programm, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, bietet die Möglichkeit, Punkte mit dem Förstner-Operator zu bestimmen und mit einem Area Based-Verfahren zuzuordnen. Aus Gründen, die in Abschnitt 4.3 näher erläutert werden, können die Punkte aber auch in einer regelmäßigen Gitterstruktur unabhängig vom Bildinhalt ausgewählt werden.

4.1.3 Näherungswerte, Tupelbildung

Die relative Genauigkeit der einzelnen Bilder eines Streifens untereinander ist zwar verhältnismäßig hoch, es sind empirisch jedoch trotzdem Abweichungen von der korrekten Position von bis zu 30 Pixel quer zur Epipolarlinie aufgetreten. Aus diesem Grund erfolgt die Punktzuordnung über Bildpyramiden, damit auch bei etwas schlechteren Näherungswerten der richtige Punkt gefunden werden kann. Da wenigstens drei, im Normalfall sogar fünf oder mehr, Bilder eines Streifens zugeordnet werden sollen, stellt sich die Frage nach der Tupelbildung. Die Bilder werden paarweise mit dem Nadirkanal als Referenzbild zugeordnet. Diese einfache Methode spart gegenüber der Zuordnung in allen Kombinationen viel Rechenzeit, da mit höherer Bildanzahl die Zahl der möglichen Kombinationen stark ansteigt (s. 3.1.4), was bei der operationellen Prozessierung großer Datenmengen nicht vernachlässigt werden sollte. Um mögliche Punktlücken zu vermeiden, die bei Aufnahme Fehlern im Referenzbild oder bei falscher Überdeckung auftreten können, ist im entwickelten Programm auch die Zuordnung in allen Kombinationen möglich. Diese Strategie ist leicht auf die Prozessierung von mehreren sich überlappenden Streifen in einem Blockverband zu übertragen. Die Tupelgenerierung erfolgt nach einer Winner-Take-All Strategie. Der Anteil grober Fehler ist relativ gering (s. 5.2.2), so dass ein robustes Verfahren für viele Ausreißer wie RANSAC nicht benötigt wird. Nach der Korrelation über Bildpyramiden sind die Näherungswerte genau genug, um ein LSM zur Genauigkeitssteigerung durchzuführen. Durch simultane Zuordnung in allen Bildern (Multi-Image LSM) wird implizit auch eine Konsistenzprüfung des Tupels auf radiometrischer Basis durchgeführt. Eine geometrische Konsistenzprüfung über einen Vorwärtsschnitt muss somit während der Zuordnung nicht stattfinden, weshalb dieses erst in der Bündelausgleichung durchgeführt wird.

4.1.4 Vorentzerrung

Um den Anteil der Ausreißer tatsächlich gering zu halten und um eine gleichmäßige Abdeckung des Gebiets zu erzielen, wird von Möglichkeiten der Stabilisierung des Verfahrens Gebrauch gemacht. Das bedeutet konkret, dass die bei einer hochelliptischen Bahn unweigerlich auftretenden Maßstabsunterschiede durch eine Vorentzerrung ausgeglichen werden. Dabei werden zusätzlich auch alle anderen geometrischen Eigenarten der HRSC-Daten kompensiert: Entstehung nicht-quadratischer Pixel aufgrund nicht optimal eingestellter Integrationszeiten, gespiegelte Bilder bei um 180° gedrehter Sonde oder um 180° gedrehte Bilder bei Nord-Süd bzw. Süd-Nord Flugrichtung. Diese Besonderheiten müssen bei nicht entzerrten Daten explizit berücksichtigt werden, wobei die Verzerrungen nicht beseitigt werden können. Zur Verdeutlichung der möglichen Verzerrungen wird in Abb. 23 ein Ausschnitt aus Streifen h0030_0000 gezeigt, der das gleiche Gebiet aus dem Nadir-, Stereo 1- und Stereo 2-Kanal und als Orthobild zeigt. Der Maßstabsunterschied vom Faktor 2 im Nadirkanal wurde schon beseitigt.

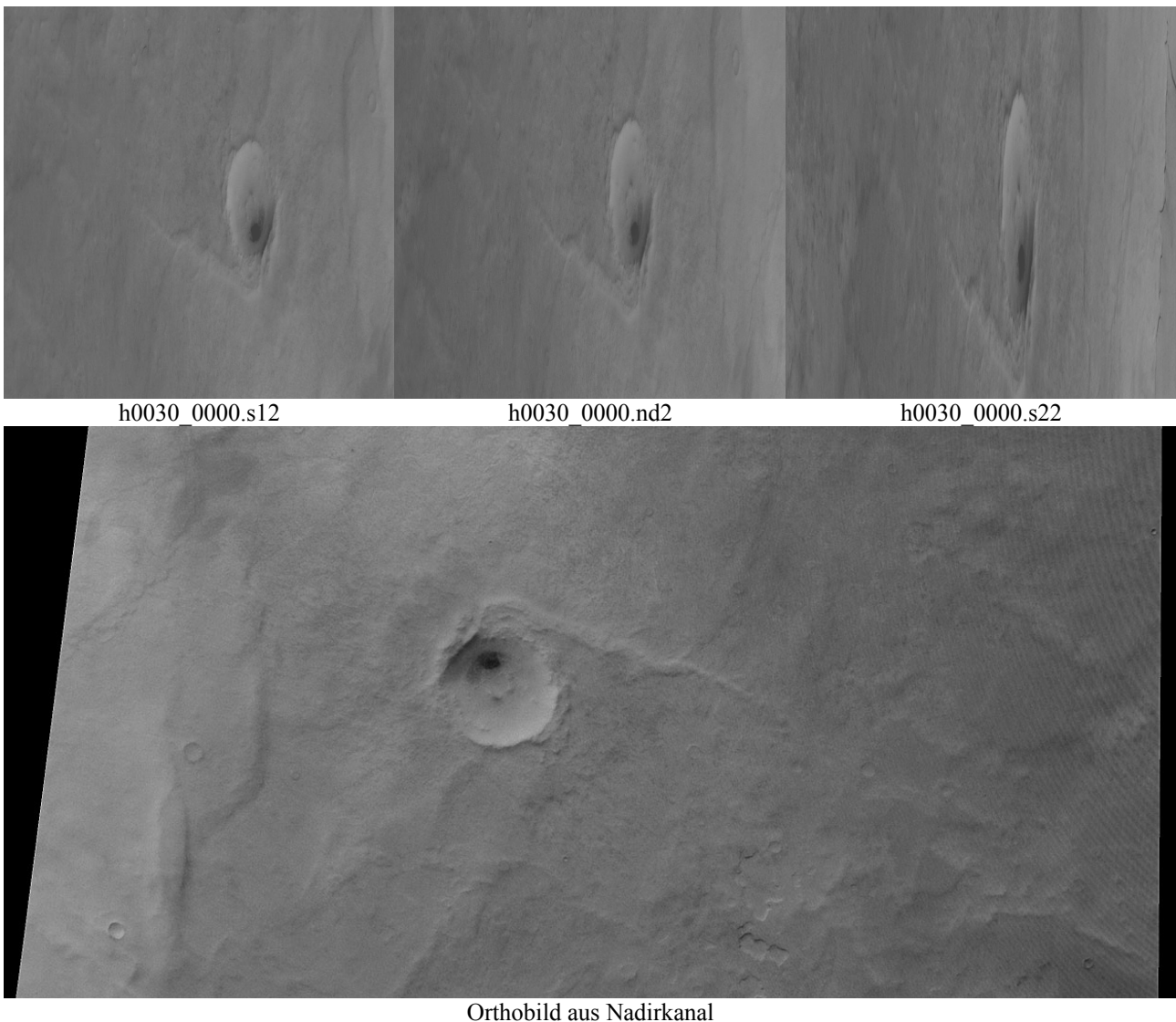


Abb. 23: Viermal der gleiche Ausschnitt aus h0030_0000

Zur Vorentzerrung steht das MOLA-DGM (s. 2.2.3.4) zur Verfügung, prinzipiell ist aber auch die Entzerrung auf einen Ellipsoid, eine Kugel oder für Aufnahmen mit lokalem Charakter eine Ebene möglich. Durch die Verwendung eines DGMs zur Vorentzerrung werden die Parallaxen verringert, so dass der Einfluss der Topographie auf den Suchraum gemindert wird und somit vornehmlich von der Genauigkeit der Äußeren Orientierung abhängt. Die Maßstabsunterschiede durch die Makropixelbildung um den Faktor 2 werden durch Resampling auf einen gemeinsamen Maßstab

aller Bilder beseitigt. Auch die sogenannten skaleninvarianten Methoden wie z. B. SIFT (s. 3.1.2.2) erzielen dies bei Unterschieden größer als Faktor 2 durch die Generierung mehrerer Oktaven gefilterter Bilder, die durch Verkleinern des Bildes um den Faktor 2 erzeugt werden (Lowe 2004). Ab einem Maßstabsverhältnis von 1:1,5 wird im Allgemeinen bereits ein starker Abfall der Zuverlässigkeit der Zuordnung beobachtet (Schmid et al. 2000). Läge ein Maßstabsunterschied mit einem unbekanntem Faktor vor, müssten verschiedene Skalen in diversen Bildpartitionen ausprobiert werden (Dufournaud et al. 2000, 2004), oder der Faktor wird durch eine Relationale Zuordnung (s. 3.1.2.4) bestimmt (Van Der Merve & Rüther 1996, Heipke & Hinz 1998). Bei Mars Express ist die Geometrie allerdings durch die gegebene Innere und Äußere Orientierung bekannt.

Neben den konstanten (wegen Makropixelbildung) und variierenden (wegen hochelliptischen Orbits) Maßstabsunterschieden ist vor allem die oftmals geringe Textur sehr problematisch bei der Bildzuordnung. Um genügend Grauwertvariationen im Korrelationsfenster zu erhalten, müssen möglichst große Fenster verwendet werden. Demgegenüber steht die Forderung nach möglichst kleinen Fenstern an Disparitätssprüngen, die aber wie schon erwähnt hier kein großes Problem darstellen. An dieser Stelle werden noch zwei Vorteile der Vorentzerrung deutlich: Durch die Verminderung des Einflusses der Topographie und Blickrichtung können sehr große Fenster verwendet werden, und die Parameter der geometrischen Transformation beim LSM können auf zwei Translationen beschränkt werden, wodurch Probleme der Überparametrisierung vermieden werden. Dies bedeutet letztendlich, dass die in 3.1.1.1 erwähnten impliziten Annahmen (keine Maßstabsunterschiede, parallele Bild- und Objektebenen, keine sonstigen Bildverzerrungen) durch die Vorentzerrung weitgehend hergestellt werden, wovon nur die Annahme über eine konstante Disparität im Fenster ausgenommen ist.

4.1.5 Kostenfunktion

Jetzt muss noch geklärt werden, welche Kostenfunktion für die Korrelation verwendet werden soll. Die absoluten (SAD) oder quadrierten (SSD) Differenzen sind für die HRSC-Daten nicht geeignet, da durch unterschiedliche Gain-Faktoren und Belichtungszeiten der einzelnen Bilder eines Streifens die radiometrischen Unterschiede groß ausfallen können. Bei benachbarten Streifen können die Diskrepanzen sogar noch extremer sein. Aus diesem Grund bietet sich der NCC als Ähnlichkeitsmaß an, da dieser wegen der Normalisierung unempfindlich bezüglich Differenzen in Helligkeit und Kontrast ist. Aber auch Mutual Information scheint geeignet zu sein, da dieses Maß gänzlich unempfindlich gegenüber globalen radiometrischen Unterschieden ist. Es wurde bereits erfolgreich mit planetaren Daten eingesetzt (Hirschmüller et al. 2006), wobei aber zu erwähnen ist, dass es sich um ein globales Verfahren handelt. Mutual Information benötigt zur zuverlässigen Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes eine ausreichend große Menge an Grauwerten, weswegen es sich ausschließlich zur Zuordnung ganzer Bilder bzw. genügend großer Bildpartitionen wie in (Hirschmüller et al. 2006) eignet. Eine Untersuchung mit einem lokalen Fenster (Egnal 2000) brachte gegenüber der Kreuzkorrelation keine Verbesserung, außer es wurden radiometrische Unterschiede untersucht, die vom NCC nicht bewältigt werden können. Bei den HRSC-Daten treten die in (Egnal 2000) festgestellten Probleme noch deutlicher hervor. Bei kleineren Fenstern ist MI relativ rauschanfällig. Außerdem muss empirisch festgestellt werden, wie viele Spalten für das Histogramm zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichte verwendet werden. Bei dem oft schwachen Kontrast der HRSC-Bilder wären 256 Spalten deutlich zu viele, zu wenig Spalten erlauben allerdings ebenso keine zuverlässige Zuordnung. Abhilfe würde eine Schätzung mit Parzen-Fenstern (Parzen 1962) schaffen, die wiederum größere Fenster erfordert. Für das hier implementierte lokale Verfahren ist MI daher ungeeignet.

Zusammengefasst lässt sich das Zuordnungsverfahren folgendermaßen charakterisieren: Die Verknüpfungspunkte werden über ein lokales flächenbasiertes Verfahren paarweise mit dem NCC als Ähnlichkeitsmaß automatisch zugeordnet. Die Beschaffung der erforderlichen Näherungswerte erfolgt über die gegebene Äußere Orientierung, das MOLA-DGM und einen pyramidenbasierten Ansatz. Zu Genauigkeitssteigerung und radiometrischen Konsistenzprüfung der Tupel wird anschließend ein Multi-Image LSM durchgeführt. Die Berücksichtigung der HRSC-spezifischen geometrischen Eigenschaften wird durch eine Vorentzerrung der Bilder kompensiert.

Als letztes soll hier noch erwähnt werden, dass die Bilder vor der Zuordnung gefiltert werden, um Rauschen und Kompressionsartefakte zu unterdrücken und um die Zuordnung zuverlässiger und stabiler ablaufen zu lassen. Außerdem ist es generell sinnvoll, hohe Frequenzen zur Verbesserung der Korrelation zu dämpfen (Pratt 1974, Helava 1976).

4.2 Prozessierungskette

Wie schon in 2.3.3.1 erwähnt, werden die Bilddaten der HRSC in der Sonde mit 8 Bit-Genauigkeit quantisiert. Der eigentliche Sensor könnte zwar eine radiometrische Auflösung von 10 Bit liefern, die DCE kann allerdings nur 8 Bit verarbeiten. Die vom ESOC zum DLR gelieferten Kamerarohdaten werden als Level-0 Daten bezeichnet, die nach Dekomprimierung und Aufteilung in die einzelnen Kanäle als Level-1 Daten vorliegen. Es folgt die radiometrische

Kalibrierung, bei der auch Grauwerte höher als 255 entstehen können, so dass nun 16 Bit-Bilddaten vorliegen. Zusätzlich werden aus den SPICE-Kernels die Exteri-Files gerechnet, die für jede Bildzeile die sechs Elemente der Äußeren Orientierung enthalten (s. 2.3.3.4). Diese Level-2 Daten genannten Bilder sind die Ausgangsdaten für die photogrammetrische Verarbeitung. Bei den Level-3 Daten handelt es sich um Orthophotos, welche mit der nominellen Äußeren Orientierung des ESOC und dem MOLA-DGM entzerrt werden. Höherwertige Produkte wie DGMs, Orthophotos bzw. Orthophotomosaiken, die aus den HRSC-Daten mit verbesserter Äußerer Orientierung (Spiegel 2007) erstellt wurden, werden als Level-4 bezeichnet. Der prinzipielle Ablauf bei der automatischen Bestimmung der Verknüpfungspunkte ist in Abb. 24 dargestellt.

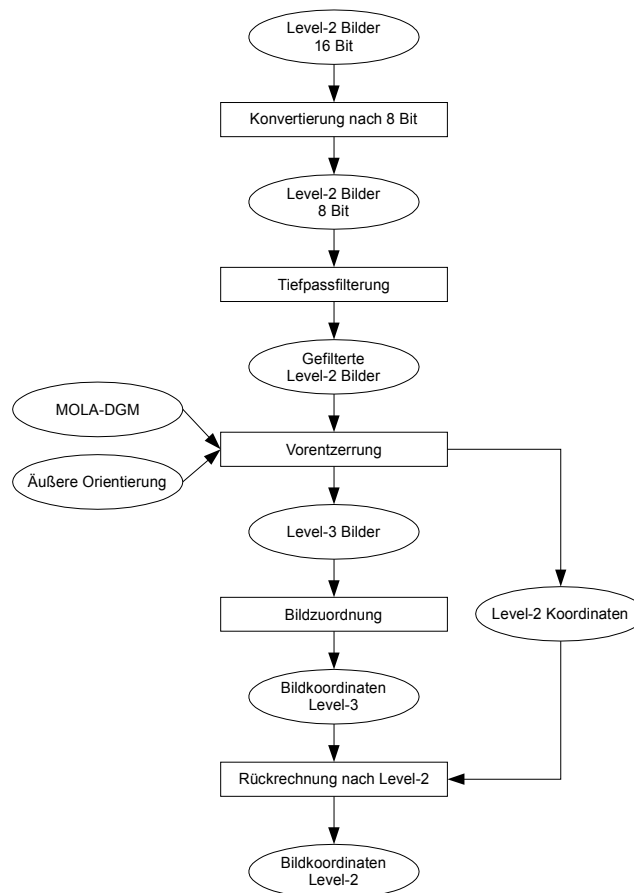


Abb. 24: Prozessierungskette zur automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten

Die gesamte Prozessierungskette ist in die VICAR-Umgebung (Video Image Communication and Retrieval, <http://www-mipl.jpl.nasa.gov/external/vicar.html>) eingebettet und als Shell-Skript realisiert. Für die Vorentzerrung und die Rückrechnung nach Level-2 wird vom DLR entwickelte Software eingesetzt, welche in (Scholten et al. 2005) beschrieben wird. Um Platz im Arbeitsspeicher des Rechners zu sparen, werden die 16 Bit-Bilder zunächst nach 8 Bit zurückgewandelt. Bei der Umwandlung wird ein Min-Max-Stretch ausgeführt, wobei allerdings am oberen und unteren Rand 1% der Pixelwerte ignoriert werden. Dadurch werden Ausreißerpixel wie z. B. falsch belichtete Pixel nicht berücksichtigt, die das Ergebnis verzerren würden. Ein Informationsverlust ist durch die Umwandlung nicht zu befürchten, da die vollen 8 Bit erfahrungsgemäß praktisch nie ganz belegt werden. In kontrastarmen Bildern werden sogar deutlich weniger Bits benötigt. Danach wird optional mit einem Tiefpassfilter (s. 5.1.3) das Rauschen verringert, um möglichst viele gleichmäßig verteilte Punkte zu erzielen. Aus den gefilterten Bildern wird mit der gegebenen Äußeren Orientierung und dem MOLA-DGM ein vorentzerrtes Bild erstellt. Technisch gesehen handelt es sich dabei um ein Orthophoto im Level-3 Format bzw. ein Epipolarbild.

Bei der Generierung des vorentzerrten Bildes wird zunächst das Zielgebiet berechnet und dann das Orthophoto über die Direkte Methode generiert. Dazu werden in regelmäßigen Abständen sogenannte Ankerpunkte vom Level-2 Bild mit der Oberfläche zum Schnitt gebracht, welche in diesem Fall durch das MOLA-DGM repräsentiert wird. Der prinzipielle Ablauf der Koordinatenumrechnungen wird in Abb. 25 dargestellt:

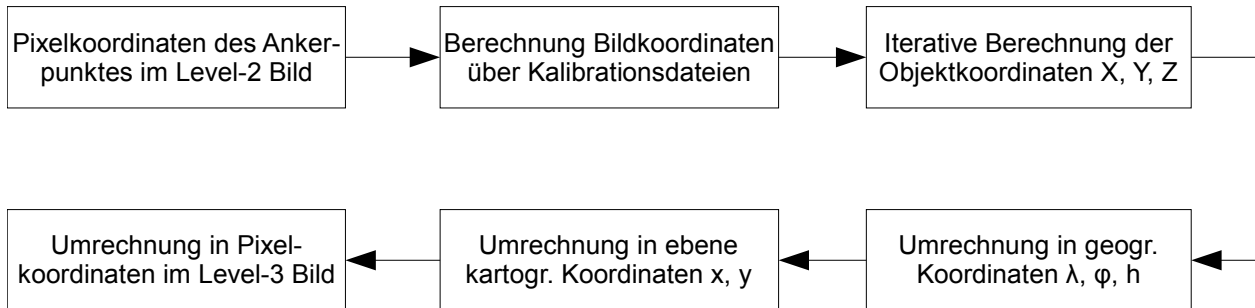


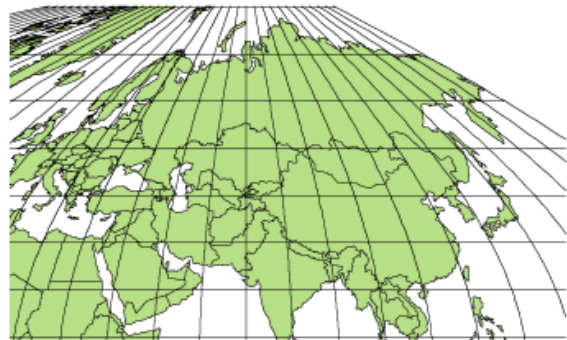
Abb. 25: Erforderliche Koordinatenumrechnungen bei der Vorentzerrung

Die Umrechnung von Pixelkoordinaten nach Bildkoordinaten erfolgt über Kalibrationsdateien. In diesen sind für den jeweiligen Kanal in einer Look-Up-Table für jedes der 5176 Pixel die entsprechenden Bildkoordinaten abgespeichert, welche sich auf eine virtuelle Brennweite von 175 mm beziehen (vgl. 2.3.3.2). Dieses Kameramodell der Inneren Orientierung vom DLR arbeitet etwas anders als das Münchner Modell (Ebner et al. 1994), das noch in einer früheren Version des in Abschnitt 4.3 vorgestellten Zuordnungsverfahrens (Heipke et al. 2004) eingesetzt wurde, welches in Level-2 Bildern arbeitet. Auch in der Bündelausgleichung (Spiegel 2007) wird das Münchner Modell verwendet. Die Unterschiede zwischen den beiden Modellen liegen nach einem Vorwärtsschnitt an der Marsoberfläche im Bereich von ca. einem Dezimeter. Da das Kameramodell bei der Zuordnung nur zur Bestimmung des Näherungswertes des homologen Punktes verwendet wird, hat es keinen Einfluss auf die endgültigen Bildkoordinaten der Tupel. Pro Ankerpunkt werden über die Kollinearitätsgleichungen mit einer Näherungshöhe Z , welche sich aus den gegebenen Bahndaten ergibt, die areozentrischen (marszentrischen) kartesischen Koordinaten X und Y berechnet. An dieser Stelle kann aus dem MOLA-DGM eine verbesserte Höhe abgegriffen werden, so dass nach einem iterativen Prozess die endgültigen Objektkoordinaten X , Y , Z gefunden werden. Die Umrechnung der areozentrischen kartesischen Koordinaten in geographische Koordinaten erfolgt bei der Kugel mit folgenden Formeln:

$$\begin{aligned}\lambda &= \arctan \frac{Y}{X} \\ \varphi &= \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ h &= \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi} - R\end{aligned}\quad (26)$$

Die geographischen Koordinaten werden nun in ebene kartographische umgerechnet. Im Rahmen der systematischen Prozessierung wurden vom DLR einheitliche Bezugssysteme festgelegt. Als Bezugskörper wird für die Vorentzerrung eine Kugel mit einem Radius von 3396 km verwendet, die auch als Referenz für das MOLA-DGM verwendet wird. Prinzipiell ist auch ein Ellipsoid als Bezugskörper möglich. Am Mars wäre das z.B. der aktuelle IAU/IAG 2000 Ellipsoid (Duxbury et al. 2002, Seidelmann et al. 2002) mit 3396,19 km langer großer Halbachse (äquatorialer Radius) und 3376,20 km langer kleiner Halbachse (polarer Radius). Die Wahl des Bezugskörpers hat für die Genauigkeit der in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren aber letztendlich keinen Einfluss. Als kartographisches Bezugssystem wird die Sinusoidale Projektion benutzt, welche folgende Merkmale aufweist (Snyder 1987):

- Pseudozylindrische Projektion
- Flächentreue Abbildung
- Der Hauptmeridian ist eine gerade Linie, alle anderen Meridiane sind gleichabständige sinusoidale Kurven.
- Die Breitengrade sind gleichabständige gerade Linien, die parallel zueinander verlaufen. Die Pole sind Punkte.
- Maßstabstreue entlang des Hauptmeridians und aller Breitengrade



Die Formeln für die Kugel lauten:

$$x = R(\lambda - \lambda_0) \cos \varphi, \quad y = R \varphi \quad (27)$$

bzw. für den umgekehrten Fall:

$$\varphi = y/R, \quad \lambda = \lambda_0 + x/(R \cdot \cos \varphi) \quad (28)$$

mit R = Radius der Kugel, hier 3396 km
 x = Rechtwinklige Koordinate, Distanz zum Hauptmeridian, gezählt nach Osten
 y = Rechtwinklige Koordinate, Distanz über der horizontalen Linie, welche durch den Ursprung bzw. das Zentrum der Projektion verläuft, hier der Äquator
 λ = Östliche Geographische Länge
 λ_0 = Östliche Geographische Länge des Hauptmeridians
 φ = Geographische Breite

Die Geographische Länge des Hauptmeridians wird vorher nach dem Zentrum des Nadirkanals (gerundet) automatisch im Shell-Skript bestimmt und auch für die restlichen Kanäle verwendet. Die Formeln für einen ellipsoidischen Bezugskörper sind in (Snyder 1987) zu finden.

Wenn das Zielgebiet am Nord- oder Südpol liegt, wird als Bezugsfläche die Stereographische Projektion (Snyder 1987) verwendet, die folgende Eigenschaften aufweist:

- Azimutale, konforme Abbildung
- Alle Meridiane sind (im polaren Fall) gerade Linien.
- Perspektivische Projektion der Kugel
- Richtungen vom Zentrum der Projektion (Pol) sind korrekt dargestellt.
- Der Maßstab nimmt vom Zentrum der Projektion hinweg zu.
- Es kann nur eine Hälfte der Kugel dargestellt werden.



Die Formeln für die Kugel mit den gleichen Bezeichnungen wie in (27) und (28) lauten:

$$x = Rk \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0), \quad y = Rk [\cos \varphi_1 \sin \varphi - \sin \varphi_1 \cos \varphi \cos(\lambda - \lambda_0)] \quad (29)$$

mit $k = 2k_0/[1 + \sin \varphi_1 \sin \varphi + \cos \varphi_1 \cos \varphi \cos(\lambda - \lambda_0)]$
 k = Relativer Maßstabsfaktor entlang eines Breitengrades
 k_0 = Zentraler Maßstabsfaktor, normalerweise 1,0
 φ_1 = Geographische Breite des Zentrums der Projektion

Für den Nordpol mit $\varphi_1 = 90^\circ$ vereinfachen sich die Formeln zu:

$$x = 2Rk_0 \tan(\pi/4 - \varphi/2) \sin(\lambda - \lambda_0), \quad y = -2Rk_0 \tan(\pi/4 - \varphi/2) \cos(\lambda - \lambda_0) \quad (30)$$

Für den Südpol mit $\varphi_1 = -90^\circ$ vereinfachen sich die Formeln zu:

$$x = 2 R k_0 \tan(\pi/4 + \varphi/2) \sin(\lambda - \lambda_0), \quad y = 2 R k_0 \tan(\pi/4 + \varphi/2) \cos(\lambda - \lambda_0) \quad (31)$$

Für den umgekehrten Fall ergeben sich folgende Formeln:

$$\varphi = \arcsin[\cos c \sin \varphi_1 + (y \sin c \cos \varphi_1 / \rho)] \quad (32)$$

Wenn $\varphi_1 \neq \pm 90^\circ$ gilt:

$$\lambda = \lambda_0 + \arctan[x \sin c / (\rho \cos \varphi_1 \cos c - y \sin \varphi_1 \sin c)] \quad (33)$$

Wenn $\varphi_1 = 90^\circ$ gilt:

$$\lambda = \lambda_0 + \arctan[x / (-y)] \quad (34)$$

Wenn $\varphi_1 = -90^\circ$ gilt:

$$\lambda = \lambda_0 + \arctan(x / y) \quad (35)$$

mit $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ = Radius des Breitengrades
 $c = 2 \arctan[\rho / (2 R k_0)]$ = Großkreisdistanz als Winkel

Die Formeln für einen ellipsoidischen Bezugskörper sind ebenfalls in (Snyder 1987) enthalten. Im Nord- bzw. Südpolfall wird als Hauptmeridian 0° und für das Zentrum der Projektion 90° bzw. -90° Breite angenommen. Für die Entzerrung muss außerdem noch der Maßstab festgelegt werden, in dem die Zuordnung erfolgen soll. Eine Untersuchung dazu wird in 5.2.2 präsentiert. Die Rechtwinkligen Koordinaten der Kartenprojektion werden über die Formeln 27 bzw. 30 und 31 im Polfall berechnet. Die Pixelkoordinaten ergeben sich aus dem Bildmaßstab und den Koordinaten der linken oberen Ecke des Level-3 Bildes. Die Pixel zwischen den Ankerpunkten werden aus dem Level-2 Bild bilinear interpoliert, so dass eine effiziente Vorentzerrung ermöglicht wird.

Die nötigen Koordinatentransformationen zur Punktübertragung bei der Zuordnung gestaltet sich einfacher und erfolgt nach dem folgenden Schema:

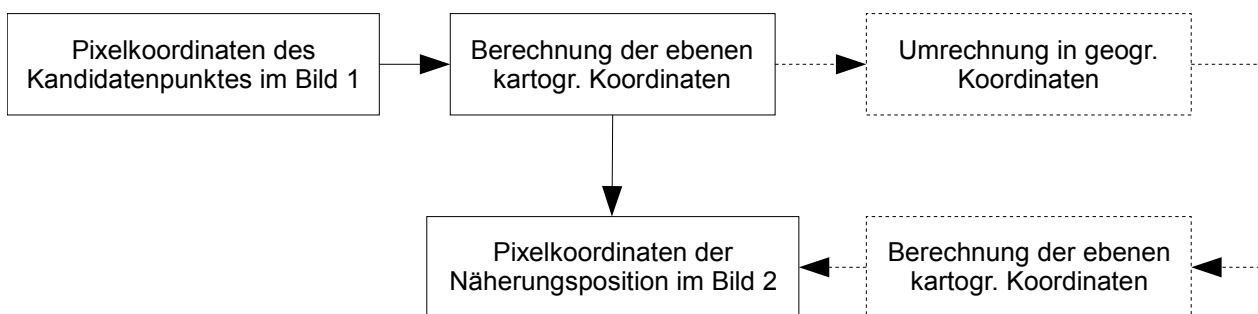


Abb. 26: Koordinatentransformationen zur Punktübertragung bei der Zuordnung. Der gestrichelte Pfad ist nur bei unterschiedlichen Kartenprojektionen der beiden Bilder notwendig. Bei gleicher Kartenprojektion genügt der Pfad entlang der durchgezogenen Pfeile.

Die Pixelkoordinaten des Kandidatenpunktes werden über den bekannten Bildmaßstab und die bekannten kartographischen Koordinaten der linken oberen Ecke des Level-3 Bildes in ebene kartographische Koordinaten umgerechnet. Wenn das Partnerbild in der gleichen kartographischen Projektion vorliegt, was normalerweise der Fall sein sollte, kann die Umrechnung in Pixelkoordinaten über den umgekehrten Weg erfolgen (Pfad entlang der durchgezogenen Pfeile). Falls das Partnerbild eine andere Kartenprojektion verwendet, werden die kartographischen Koordinaten mit den Formeln (28) bzw. (32)–(35) im Polfall zunächst in geographische Koordinaten umgerechnet. Mit den umgekehrten Formeln der kartographischen Projektion des Partnerbildes können dann die Pixelkoordinaten berechnet werden (gestrichelter Pfad).

In den Level-3 Bildern findet die eigentliche Zuordnung statt, die im anschließenden Abschnitt 4.3 genauer beschrieben wird. Als Ergebnis wird eine Liste von Pixelkoordinaten der Verknüpfungspunkte erhalten. Da diese sich auf die Level-3 Bilder beziehen, müssen sie noch auf Pixelkoordinaten zurückgerechnet werden, die sich auf die Level-2 Bilder beziehen. Nur in diesen gelten die Kollinearitätsgleichungen, die in der Bündelausgleichung zur Punktbestimmung verwendet werden. Dazu werden bei der Erzeugung der Level-3 Bilder zwei zusätzliche Dateien (jeweils für Zeile und Spalte, in Abb. 24 mit „Level-2 Koordinaten“ bezeichnet) generiert, in denen für jeden Ankerpunkt vermerkt wird, von welcher Stelle im Level-2 Bild das jeweilige Level-3 Pixel stammt. Die Rückrechnung nach Level-2 kann also über eine Art Look-Up-Table erfolgen. Die Level-2 Pixelkoordinaten der homologen Punkte sind das Endergebnis der Bildzuordnung und dienen als Eingabedaten für die anschließende Bündelausgleichung (Spiegel 2007).

4.3 Zuordnungsverfahren

In diesem Abschnitt wird nun das eigentliche Zuordnungsverfahren beschrieben, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Die grundsätzliche Bestimmung des gewählten Verfahrens wurde bereits in Abschnitt 4.1 erarbeitet und wird hier nicht wiederholt. Das aus dem Verfahren entstandene Programm namens *hrtp* (HRSC Tie Points) läuft unter der VICAR-Umgebung, so dass ein standardisierter Datenfluss ermöglicht wurde. Der Ablaufplan des Verfahrens ist in Abb. 27 skizziert und wird im Folgenden erläutert.

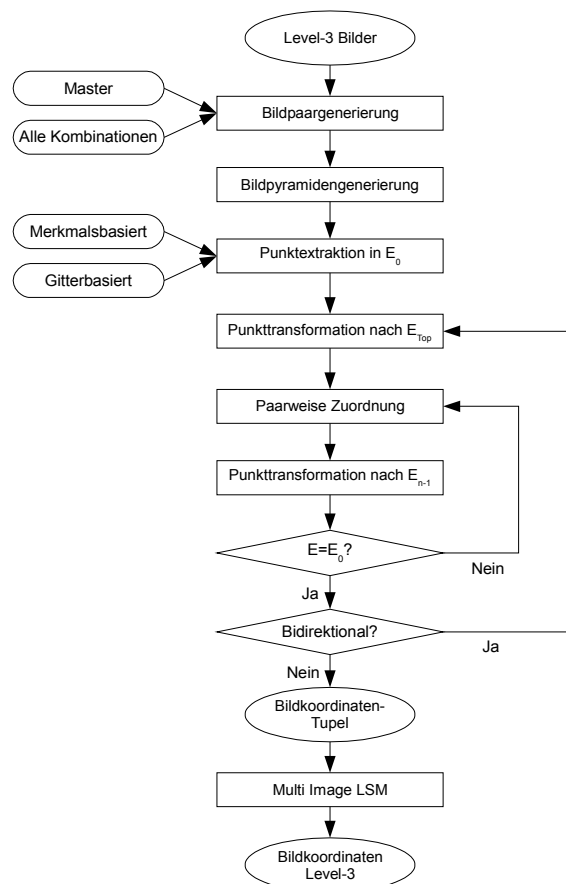


Abb. 27: Ablaufplan der Zuordnung

Als Eingabedaten dienen die gefilterten und vorentzerrten Level-3 Bilder, die alle den selben Maßstab und die selbe Kartenprojektion verwenden sollten, damit sich die Bilder so ähnlich wie möglich sehen bzw. keine geometrischen Verzerrungen untereinander aufweisen. Als erstes werden die Bildpaare festgelegt, zwischen denen die Bildzuordnung durchgeführt werden soll. Dabei kann zwischen zwei Möglichkeiten gewählt werden: Nach dem Master-Konzept wird für den zu bearbeitenden Bildstreifen ein Master-Bild bestimmt, welches dann paarweise den übrigen Bildern zugeordnet wird. Als Master-Bild wird der Nadirkanal verwendet, der dann im Normalfall den beiden Stereokanälen S1 und S2 und den beiden Photometriekanälen P1 und P2 zugeordnet wird. In dieser Konstellation ergeben sich vier Bildpaare, die nacheinander abgearbeitet werden. Prinzipiell können auch die vier Farbkanäle BL, GR, RE und IR miteinbezogen werden, so dass sich insgesamt acht Bildpaare ergeben. Dies ist aber nur selten sinnvoll, da die Farbkanäle häufig nur eine Auflösung im MPF 8 und hohe Kompressionsraten aufweisen (s. 5.1.2.3). Als zweite Möglichkeit der Bildpaargenerierung können die Bilder in allen Kombinationen zugeordnet werden. Bei den normalerweise fünf verwendeten Kanälen ergeben sich folgende zehn Kombinationen: ND-S1, ND-S2, ND-P1, ND-P2, S1-S2, S1-P1, S1-P2, S2-P1, S2-P2, P1-P2. Werden alle neun Kanäle zugeordnet, ergeben sich insgesamt 36 verschiedene Bildpaare. Die Zuordnung in allen Kombinationen ist aber nur in Ausnahmefällen bei fehlerhafter Überdeckung oder lückenhaftem Master-Kanal sinnvoll; normalerweise wird das Prinzip des Master-Kanals angewandt.

Die Bildpaare werden der Reihe nach abgearbeitet. Für das Master-Bild und das jeweilige Partnerbild werden Gauß-Pyramiden generiert, und auf der untersten (Original-)Ebene E_0 werden die zu bearbeitenden Kandidatenpunkte ausgewählt. Auch hierbei stehen zwei verschiedene Wege zur Verfügung: Die Punkte können entweder merkmalsbasiert über den Förstner-Operator (s. 3.1.2.2) extrahiert werden, oder die Punkte werden in einem regelmäßigen Gitter über das Bild verteilt. Bei der merkmalsbasierten Extraktion müssten die Punkte theoretisch in jeder Pyramidenebene neu extrahiert werden, um die Korrelation an möglichst guten Merkmalen durchzuführen. In diesem Ansatz werden die Punkte aus praktischen Gründen nur in der untersten Ebene extrahiert und durch die Ebenen verfolgt. Empirisch hat sich gezeigt, dass auch mit dieser Methode die richtigen Näherungswerte für die unterste Ebene E_0 gefunden werden. Beim zweiten Ansatz wird von der linken oberen Ecke des Master-Bildes ausgehend eine gleichmäßige Verteilung in Gitteranordnung generiert. Die Anzahl der zu erzeugenden Punkte kann über die Gitterweite gesteuert werden. Bei der operationellen Prozessierung der HRSC-Bildstreifen hat sich gezeigt, dass der Gitteransatz bezüglich der anschließenden Bündelausgleichung die besseren Ergebnisse liefert. Insbesondere bei der Einpassung der von der Zuordnung generierten Punktwolke in das MOLA-DGM ist eine dichte gleichmäßige Punktwolke vorteilhaft, da diese sich stabiler in das MOLA-Gitter einpassen lässt. Diese gleichmäßige dichte Punktabdeckung kann mit dem merkmalsbasierten Verfahren speziell bei den HRSC-Bilddaten nicht immer gewährleistet werden. Die bei der operationellen Prozessierung gewonnene Erfahrung lässt einen weiteren Einflussfaktor vermuten: Mit einem merkmalsbasierten Verfahren werden bevorzugt Punkte an Kanten generiert, die auf der Marsoberfläche mit Bruchkanten zusammenfallen. Diese Kanten, an denen sich die Höhe ändert, wird oftmals von den MOLA-Daten wegen der geringeren räumlichen Auflösung nicht fein genug erfasst. Das hat zur Folge, dass bei der Minimierung der Höhendifferenzen der beiden Punktwolken in der Bündelausgleichung nur suboptimale Ergebnisse erhalten werden.

Die Kandidatenpunkte werden der Reihe nach abgearbeitet. Der jeweilige Punkt wird von der untersten Ebene E_0 in die oberste Pyramidenebene E_{Top} transformiert. Um die Näherungsposition im Partnerbild zu bestimmen, werden nach der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methode die Pixelkoordinaten in kartographische Koordinaten und dann zurück mit den umgekehrten Formeln in Pixelkoordinaten des Partnerbildes umgerechnet. An dieser Näherungsposition des gesuchten homologen Punktes wird nun der Suchraum aufgespannt. In Zeilenkameras existieren keine Epipolarlinien, so dass diese nicht direkt zur Suchraumeinschränkung benutzt werden können. Es ist aber die Berechnung von Quasi-Epipolarlinien möglich (Pateraki & Baltsavias 2003), die bei linearer Bewegung des Scanners als Hyperbeln (Gupta & Hartley 1997) und bei nichtlinearen Bewegungen als Kurven abgebildet werden (Hirschmüller et al. 2005).

In den vorentzerrten Level-3 Bildern wurden die Parallaxen schon deutlich verringert. Entlang der Flugrichtung ergeben sich die x-Parallaxen aus den Fehlern in der Äußeren Orientierung und der Topographie im MOLA-DGM. Quer zur Flugrichtung sind die verbleibenden y-Parallaxen sehr gering. Der Suchraum wird demgemäß als ein Rechteck entlang der Flugrichtung aufgespannt. Wie in 4.1 erläutert, wird als Ähnlichkeitsmaß der Normalisierte Kreuzkorrelationskoeffizient (NCC) verwendet (s. Formel 9). Wird ein festzulegender Schwellwert für die Stelle der höchsten Korrelation überschritten, werden die Koordinaten als gültiger Punkt übernommen. Der Ergebnispunkt wird in die eine Stufe tiefer gelegene Pyramidenebene transformiert, in der der Vorgang wiederholt wird. Als Näherungswert dient diesmal der in der Ebene darüber gefundene Punkt. Dieser Vorgang wird bis zum Erreichen der Originalebene E_0 wiederholt. Falls gewünscht kann von hier aus zur Kontrolle des Punktes eine bidirektionale Zuordnung durchgeführt werden: Ausgehend vom soeben bestimmten Punkt wird im Master-Bild der dazugehörige homologe Punkt gesucht, der bis auf einen Schwellwert für die Distanz mit dem ursprünglichen Kandidatenpunkt übereinstimmen sollte. Wenn der Schwellwert überschritten wird, kann der Punkt verworfen werden. Diese bidirektionale Überprüfung bietet sich üblicherweise zur Detektion von Verdeckungen an, die bei den vorliegenden HRSC-Bilddaten normalerweise nicht vorkommen.

Wenn auf diese Weise alle Punkte des ersten Bildpaares zugeordnet wurden, wird mit dem nächsten Bildpaar fortgefahren. Die Tupel ergeben sich durch die Verwendung derselben Kandidatenpunkte im Master-Bild, wobei somit allerdings noch nicht notwendigerweise konsistente Tupel erhalten werden. Wird durch die Zuordnung vom Master-Bild 1 nach Bild 2 und nach Bild 3 jeweils ein Punktpaar gefunden, dann ist wegen der fehlenden Zuordnung von Bild 2 nach Bild 3 nicht sichergestellt, dass die drei Punkte zu einem Tupel zusammenpassen. Dies erfolgt erst im nächsten Schritt, bei dem in einem Multi-Image LSM (MI-LSM) alle Punkte eines Tupels gemeinsam zugeordnet werden.

Neben der Sicherstellung der Konsistenz des Koordinatentupels soll das MI-LSM vor allem die Genauigkeit der Bildkoordinaten erhöhen. Der implementierte Ansatz basiert auf dem in (Krupnik 1994) entwickelten Verfahren (s. a. Schenk & Krupnik 1996 und Krupnik & Schenk 1997). Der Unterschied besteht darin, dass hier keine Bildausschnitte um den jeweiligen Verknüpfungspunkt herum entzerrt werden, denn bei dem Ausgangsbild handelt es sich bereits um ein entzerrtes Level-3 Bild. Ursprünglich geht die Idee, die Bildzuordnung in vorentzerrten Bildausschnitten durchzuführen, auf (Norvelle 1992) zurück. Als geometrische Transformation zwischen den Bildausschnitten werden keine sechs Affinparameter sondern nur die zwei Translationen geschätzt (vgl. Formel 6), denn durch die Vorentzerrung können die Objektoberfläche und die Bildebenen genähert als parallele Ebenen angenommen werden. Es werden auch nicht die Grauwertdifferenzen zwischen den einzelnen Paaren der Bildausschnitte minimiert (vgl. Formel 7), sondern es werden die Differenzen zu den theoretischen Grauwerten des Oberflächenausschnittes minimiert, welche durch Mittelung der vorhandenen Bildausschnitte geschätzt werden. Um einen Datumsdefekt zu vermeiden, muss ein Ausschnitt festgehalten werden. Dieser Referenzausschnitt fällt in der Regel mit dem Nadirkanal zusammen. Etwaige Helligkeits- und Kontrastunterschiede werden zuvor durch eine radiometrische Anpassung bezüglich des Referenzausschnittes kompensiert (vgl. Formel 5). Ausgangspunkt der Ausgleichung ist die Annahme, dass die Grauwerte des jeweiligen Bildausschnittes $g^i(x,y)$, $i=0,\dots,n$ ($n+1$ =Anzahl der Bildausschnitte) an der Stelle (x,y) idealerweise identisch mit den Grauwerten an der Oberfläche (theoretische Grauwerte $\hat{G}(x,y)$) sind:

$$\hat{G}(x,y) - g^i(x,y) = 0 \quad (36)$$

In der Realität treten allerdings Fehler auf, die auf radiometrischen und geometrischen Ungenauigkeiten basieren. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die radiometrischen Unterschiede bis auf einen Rauschanteil durch die radiometrische Anpassung beseitigt wurden. Es verbleiben die geometrischen Abweichungen (Residuen v), die auf Fehlern bzw. Ungenauigkeiten in der Äußeren Orientierung und des MOLA-DGMs zurückzuführen sind, die durch die zwei horizontalen Translationen $d\hat{a}$ und $d\hat{b}$ des Ausschnitts i minimiert werden sollen:

$$\hat{G}(x,y) - g^i(x+d\hat{a}^i, y+d\hat{b}^i) = v(x,y) \quad (37)$$

Diese Gleichung kann allgemein so formuliert werden:

$$\begin{aligned} v &= \hat{G} - g(\hat{p}) \\ &= G_0 + d\hat{G} - \left(g(p_0) + \frac{\partial g}{\partial p} d\hat{p} \right) \\ &= -\frac{\partial g}{\partial p} d\hat{p} + d\hat{G} - (g(p_0) - G_0) \end{aligned} \quad (38)$$

In dieser Gleichung sind v die Residuen, \hat{G} die theoretischen Grauwerte des Referenzausschnitts, $g(p)$ die Grauwerte der Bildausschnitte, p die Translationen zwischen den Bildausschnitten, $d\hat{G}$ die unbekanntenen Differenzen zu den Näherungswerten der theoretischen Grauwerte, $d\hat{p}$ die unbekanntenen Verbesserungen für die Translationen, und der Index 0 steht für die Näherungswerte der Unbekannten. Für jedes Pixel des Referenzausschnittes kann so in jedem Bildausschnitt eine Gleichung aufgestellt werden. Die Diskretisierung führt für alle Bildausschnitte $i=1,\dots,n$ außer dem ersten 0 zu folgendem linearen Gleichungssystem:

$$v = -g_x^i(x,y)d\hat{a}^i - g_y^i(x,y)d\hat{b}^i + d\hat{G}(x,y) - g^i(x,y) + G_0(x,y) \quad (39)$$

mit x,y = Pixelkoordinaten des Bildausschnitts

$g^i(x,y)$ = Grauwert des Bildausschnitts i ($i=1,\dots,n$)

$g^0(x,y)$ = Grauwert des festgehaltenen Bildausschnitts 0

g_x^i = Grauwertgradient von Bildausschnitt i bezüglich x

g_y^i = Grauwertgradient von Bildausschnitt i bezüglich y

$G_0(x,y)$ = Näherungswert des theoretischen Grauwerts

$d \hat{a}$, $d \hat{b}$ = unbekannte Translationsparameter zwischen Bildausschnitt i und Referenzausschnitts 0

$d \hat{G}(x, y)$ = unbekannte Änderung des theoretischen Grauwerts

Um den Datumsdefekt zu vermeiden wird der erste Bildausschnitt 0 festgehalten, so dass sich für diesen folgende Beobachtungsgleichung ergibt:

$$v = d \hat{G}(x, y) - g^0(x, y) + G_0(x, y) \quad (40)$$

Die Fehlergleichungen (39) und (40) können als Gauß-Markov Modell formuliert werden:

$$y = Ax + v \quad (41)$$

Der Unbekanntenvektor x besteht aus $2(n-1)$ Translationsparametern und $r \times c$ theoretischen Grauwerten G des Oberflächenausschnitts (r, c =Anzahl Zeilen und Spalten des Bildausschnitts). Die Unbekannten werden folgendermaßen geschätzt:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (42)$$

Die relativ große Anzahl an Unbekannten führt zu einem großen Normalgleichungssystem mit rechenintensiver Invertierung. Zur frühzeitigen Eliminierung von G lässt sich durch Unterteilung in unbekannte Translationen und unbekannte theoretische Grauwerte die Design-Matrix A horizontal und der Unbekanntenvektor x vertikal partitionieren (Krupnik 1994, 1996):

$$y = [A_1 \ A_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + v \quad (43)$$

Das Normalgleichungssystem ergibt sich somit zu:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (44)$$

mit $N_{i,j} = A_i^T A_j$ und $c_i = A_i^T y_i$

Auflösen nach dem Vektor der unbekannt theoretischen Grauwerte x_2 in der zweiten Gleichung von Formel 44 ergibt:

$$x_2 = N_{22}^{-1} c_2 - N_{22}^{-1} N_{21} x_1 \quad (45)$$

Durch Substituieren in die erste Gleichung wird x_2 eliminiert, und es ergibt sich für x_1 :

$$x_1 = (N_{11} - N_{12} N_{22}^{-1} N_{21})^{-1} (c_1 - N_{12} N_{22}^{-1} c_2) \quad (46)$$

Durch die Beschränkung auf zwei Translationen handelt es sich bei N_{22} um eine Diagonalmatrix mit der Anzahl n aller Bildausschnitte als Diagonalelemente. Die Inverse kann somit leicht angegeben werden:

$$N_{22}^{-1} = \frac{1}{n} E \quad (47)$$

x_2 kann dann abgeleitet aus Formel 45 folgendermaßen berechnet werden:

$$x_2 = \frac{1}{n} (c_2 - N_{21} x_1) \quad (48)$$

In (Krupnik 1994, 1996) wurde gezeigt, dass die theoretischen Grauwerte x_2 genähert auch einfach als Mittelwert der Grauwerte der um nun x_1 verschobenen Bildausschnitte berechnet werden können. Das lineare Gleichungssystem wird iterativ gelöst bis die Verbesserungen einen einzustellenden Schwellwert unterschreiten. Als Ergebnis werden die verbesserten Bildkoordinaten des aktuellen Tupels erhalten, und es kann mit dem nächsten fortgefahren werden.

4.4 Bündelausgleichung

An dieser Stelle soll kurz das Konzept der Bündelausgleichung beschrieben werden, die aus den mit dem obigen Verfahren generierten Punkten die verbesserte Äußere Orientierung berechnet. Die Bündelausgleichung wurde ebenfalls für die Analyse eines Großteils der im nächsten Kapitel präsentierten Ergebnisse eingesetzt. Eine detaillierte Darstellung und Analyse der Bündelausgleichung ist in (Spiegel 2007) gegeben. Prinzipiell liegen für jede Aufnahmezeile die sechs Parameter der Äußeren Orientierung vor, die für die Position aus den Bahndaten und für die Lage aus den Daten des Sternensensors gewonnen werden. Da die Unbekannten in der Ausgleichung nicht an jeder Aufnahmezeile berechnet werden können, wird die Äußere Orientierung nur an sogenannten Orientierungspunkten, die gleichmäßig entlang des Streifens verteilt sind, geschätzt. Die Positionen dazwischen werden durch Lagrange-Polynome interpoliert. Die Ausgleichung kann grob in zwei Schritte unterteilt werden, die hier Relative und Absolute Orientierung genannt werden: Im ersten Teil werden durch Schätzen des Nick- und Gierwinkels des Orbiters an den Orientierungspunkten die Strahlenschnitte verbessert. Aus geometrischen Gründen kann der Rollwinkel nur schlecht bestimmt werden. Ebenfalls werden in diesem Schritt Punkte eliminiert, die anhand der Restfehler an den Bildkoordinaten als fehlerhaft zugeordnet betrachtet werden. Im zweiten Teil wird diese Punktwolke zur absoluten Positionierung an das MOLA-DGM angepasst. Dazu werden Biase für die drei Parameter der Position und eine Drift in der Höhenkomponente geschätzt. Zusätzlich werden die Drehwinkel, wie schon im ersten Schritt, an den Orientierungspunkten geschätzt. Ebenfalls wird der im ersten Schritt nicht bestimmbare Rollwinkel des Orbiters berechnet. In das stochastische Modell gehen die beobachteten Bildkoordinaten als unkorreliert und gleichgenau ein. Zur Schätzung der Absoluten Orientierung wird das stochastische Modell derart verändert, dass die bei der Relativen Orientierung gewonnenen Strahlenschnitte durch die Einführung des MOLA-DGMs erhalten bleiben und nur Translationen, eine Verkippung in der Höhenkomponente und die Bestimmung des Rollwinkels erfolgen. In diesem Schritt werden, neben der Anpassung der HRSC-Objektpunkte ans MOLA-DGM, zusätzlich HRSC-Objektpunkte eliminiert, indem die Differenzen zwischen den HRSC-Objektpunkten und den MOLA-Punkten betrachtet werden. Wenn einzelne HRSC-Objektpunkte größere Restdifferenzen zum MOLA-DGM aufweisen, werden diese Punkte eliminiert. Dabei handelt es sich nicht um Fehler aus der Digitalen Bildzuordnung, sondern um Punkte, die in den niedriger aufgelösten MOLA-Daten nicht sichtbar sind (z. B. kleine Krater).

5 Datenprozessierung

In diesem Kapitel werden in drei Abschnitten die Ergebnisse der praktischen Prozessierungen dokumentiert. Im ersten Teil werden die Untersuchungen zur Bildrekonstruktion präsentiert. Im nächsten Abschnitt werden das Konzept und die Ergebnisse der Untersuchungen für Einzelstreifen präsentiert. Im dritten Abschnitt wird die Behandlung von Blöcken, die sich aus mindestens zwei Einzelstreifen zusammensetzen, betrachtet. Nach Vorstellung des Konzepts werden Ergebnisse anhand von zwei ausgewählten Beispielen gezeigt, die sich bezüglich ihrer Zusammensetzung aus Einzelstreifen stark voneinander unterscheiden.

5.1 Untersuchungen zur Bildrekonstruktion

Da die Kompression nach der Bildentstehung in der Kamera ausgeführt wird, ist bei der Bildrekonstruktion der umgekehrte Weg einzuhalten. Es müssen also zunächst die Kompressionsartefakte und erst danach das Rauschen entfernt werden.

5.1.1 Eigenschaften der HRSC-Bilddaten

In einem HRSC-Bild sind mehrere voneinander unabhängige Rauschquellen überlagert, die teilweise mit der Intensität des Eingangssignals variieren. Das Rauschen kann vom Eingangssignal (in die Kamera einfallendes Licht) stammen oder von der Kamera- bzw. Bordelektronik erzeugt werden. Ein Maß für die Qualität von verrauschten Bildern ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR: Signal-to-Noise Ratio), welches folgendermaßen definiert ist:

$$SNR = \frac{\text{Nutzsinalleistung}}{\text{Rauschleistung}} = 10 \cdot \lg \frac{\sigma_{\text{Signal}}^2}{\sigma_{\text{Rauschen}}^2} \quad (49)$$

Es wird bei Bildern als das Verhältnis zwischen der Standardabweichung des unverrauschten Bildes σ_{Signal} und der Standardabweichung des Rauschens σ_{Rauschen} in einer logarithmischen Dezibel-Skala berechnet. Wenn von der Oberfläche des Mars nur ein schwaches Nutzsinal empfangen wird, aber der Rauschanteil dessen ungeachtet gleich bleibt, sinkt das Signal-Rausch-Verhältnis und die Rauschleistung tritt zunehmend in den Vordergrund. Schon das Nutzsinal unterliegt einem Rauschen, denn eine gleichförmig helle Lichtquelle sendet die Photonen nicht gleichmäßig sondern nach einer stochastischen Wahrscheinlichkeit aus, die der Poisson-Verteilung unterliegt (**Photonenrauschen**). Die gleichförmig helle Lichtquelle ist in diesem Fall die Marsoberfläche, die das Sonnenlicht in Richtung Kamera reflektiert. In der Kamera kommen noch folgende Rauschquellen hinzu:

Dunkelstrom (Dark Current): Spontane Bildung von freien Elektronen durch Wärme. Diese Ladungsbildung ohne Lichteinwirkung ist proportional zur Zeit und stark von der Temperatur abhängig. Eine Kühlung des CCD-Sensors führt zu einer Verringerung des Dunkelstroms. Während der radiometrischen Kalibrierung werden Dunkelaufnahmen erstellt, die zur Korrektur dieses Rauschanteils verwendet werden.

Thermisches Rauschen (Thermal Noise): Die spontane Elektronenbildung in den Siliziumkristallen des CCD-Sensors unterliegt zusätzlich zufälligen Schwankungen. Dieser Anteil kann theoretisch nur durch Mittelung mehrerer Dunkelaufnahmen gemindert werden, was bei der HRSC aber nicht durchgeführt wird.

Empfindlichkeitsunterschiede zwischen einzelnen Pixeln (Fixed Pattern Noise): Durch kleinste Unterschiede bei der Herstellung sind die einzelnen Pixel unterschiedlich empfindlich, d. h. sie produzieren bei gleichem Lichteinfall verschieden hohe Ladungen. Diese Charakteristik kann zusammen mit dem Dunkelstrom bei der radiometrischen Kalibrierung durch die Flat-Field Korrektur berücksichtigt werden.

Funkelrauschen (Flicker Noise): Dieses Rauschen entsteht in den Bauteilen der Ausleseelektronik und nimmt von der Charakteristik her mit zunehmender Frequenz ab (1/f-Rauschen). Es kann theoretisch nur durch Mittelung mehrerer Bilder gemindert werden.

Schrottrauschen (Shot Noise): Dieser kleine Anteil am Gesamtrauschen entsteht durch die Zufallsverteilung und -bewegung der Ladungsträger, und es hängt von der Lichtmenge und nicht von der Frequenz ab. Auch dieser Anteil könnte theoretisch nur durch Mittelung mehrerer Bilder gemindert werden.

Quantisierungsrauschen (Quantisation Noise): Bei der Digitalisierung des analogen Eingangssignals entstehen durch die begrenzte Anzahl an Quantisierungsstufen Rundungsfehler, die durch eine entsprechend hohe Abtastgenauigkeit bzw. Abspeicherung der Werte gemindert werden können. Die HRSC unterscheidet 256 (8 Bit) Helligkeitsstufen.

Weiterhin ist es möglich, dass durch elektromagnetische Einstrahlung von anderen Instrumenten bzw. der Sonde ein zusätzliches Rauschen induziert wird. Die einzelnen Rauschanteile werden und können in dieser Arbeit nicht getrennt behandelt werden, sondern das Gesamtrauschen wird hier vereinfacht als additives weißes Gaußsches Rauschen (Additive White Gaussian Noise) betrachtet, d. h. die Signalamplituden des Rauschens sind gaußverteilt und dem Nutzsignal additiv überlagert. Um die Größenordnung des Rauschens in HRSC-Bildern zu ermitteln, wurde ein sehr homogener Ausschnitt aus Streifen h0047_0000 gewählt, der keinen Bildinhalt zeigt. Der Rauschanteil wurde bestimmt, indem in 3×3 großen Fenstern jeweils die Standardabweichung berechnet wurde. Die Werte werden sortiert und aus den 95% der kleinsten Werte wird der Mittelwert berechnet, der als die Größe des Rauschens betrachtet wird. Es hat sich ein Wert von 2–3 Pixeln ergeben, was einen üblichen Wert darstellt. Das Problem bei den HRSC-Daten ist oftmals ein zu schwaches Nutzsignal, so dass sich ein niedriges SNR ergibt. Eine Untersuchung zur Verringerung dieses Rauschens wird in Abschnitt 5.1.3 behandelt.

Nachdem das Signal die Sensorelektronik passiert hat, wird das Bild in den DCE mit einem DCT-Algorithmus (s. 3.2.1) verlustbehaftet komprimiert. Es sind verschiedene Stufen der Kompression einstellbar, und sie kann sogar deaktiviert werden. In der Praxis wird in fast allen Fällen immer die schwächste Kompression eingestellt.

5.1.2 Reduzierung von Blockartefakten

In diesem Abschnitt wird der Algorithmus zur Reduzierung von Blockartefakten (s. 3.2.2) anhand von Testbildern und realen HRSC-Daten evaluiert.

5.1.2.1 Evaluierung mit Testbildern

Als ersten Test wird der grüne Kanal des bekannten Testbilds „Lena“ (s. Abb. 28) mit vier verschiedenen Quantisierungsmatrizen komprimiert und danach mit dem oben beschriebenen Algorithmus bearbeitet, um die Kompressionsartefakte zu beseitigen.



Abb. 28: Lena-Testbild (grüner Kanal)

Als mathematisches Maß für die Qualität von komprimierten Bildern wird PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) verwendet, das das Verhältnis zwischen maximal möglicher Signalstärke und Stärke des Störwerts bzw. der Artefakte in einer logarithmischen Dezibel-Skala angibt:

$$PSNR = 10 \cdot \lg \frac{I_{MAX}^2}{MSE}, \quad (50)$$

wobei I_{MAX} den maximalen Grauwert des Bildes darstellt. Bei einem 8 Bit-Bild beträgt dieser Wert dementsprechend 255. Als Störwert wird die mittlere quadratische Abweichung (Mean Square Error) verwendet:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2, \quad (51)$$

welche für zwei Graustufenbilder I und K der Größe $m \times n$ gilt, wobei es sich bei einem um das Originalbild und bei dem anderen um die komprimierte Variante handelt. Das PSNR wird nicht als ein absolutes Maß verwendet, sondern es dient dem Vergleich zweier Kompressionmethoden bzw. Algorithmen zur Rekonstruktion. Typische Werte liegen zwischen 20 und 40, und es wird in einer logarithmischen Dezibel-Skala für gewöhnlich auf zwei Dezimalstellen genau angegeben. Das MPEG-Komitee setzt einen Schwellwert von 0,5 dB für einen sichtbaren Unterschied an (Salomon 2005). Für diese Untersuchung werden die drei in (Zakhor 1992) eingeführten und häufig für derartige Tests verwendeten Quantisierungsmatrizen (Q_1 bis Q_3) benutzt. Die vierte Matrix (Q_4) verwendet den konstanten Faktor 4, der dem Wert bei der HRSC-Komprimierung entspricht:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 20 & 24 & 28 & 32 & 36 & 80 & 98 & 144 \\ 24 & 24 & 28 & 34 & 52 & 70 & 128 & 184 \\ 28 & 28 & 32 & 48 & 74 & 114 & 156 & 190 \\ 32 & 34 & 48 & 58 & 112 & 128 & 174 & 196 \\ 36 & 52 & 74 & 112 & 136 & 162 & 206 & 224 \\ 80 & 70 & 117 & 128 & 162 & 208 & 242 & 200 \\ 98 & 128 & 156 & 174 & 206 & 242 & 240 & 206 \\ 144 & 184 & 190 & 196 & 224 & 200 & 206 & 208 \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 50 & 60 & 70 & 70 & 90 & 120 & 255 & 255 \\ 60 & 60 & 70 & 96 & 130 & 255 & 255 & 255 \\ 70 & 70 & 80 & 120 & 200 & 255 & 255 & 255 \\ 70 & 96 & 120 & 145 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 90 & 130 & 200 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 120 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \end{bmatrix}$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 110 & 130 & 150 & 192 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 130 & 150 & 192 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 150 & 192 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 192 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \end{bmatrix}, \quad Q_4 = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \end{bmatrix}$$

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Untersuchung zu sehen. In den vier Zeilen sind jeweils die Ergebnisse mit den vier verschiedenen Quantisierungsmatrizen dargestellt. Die Werte der Spalte „Vorher“ entsprechen dem PSNR zwischen dem Originalbild und dem komprimierten Bild, welche bis auf sehr kleine Abweichungen denen in (Nosratinia 2001) entsprechen. Die Abweichungen beruhen wahrscheinlich auf unterschiedliche Implementationen der DCT und/oder des PSNR. Die anderen drei Spalten geben die Verbesserung des PSNR nach der Rekonstruktion an, die mit der Anzahl an Verschiebungen von allen 64 möglichen, 16 und 4 erzielt wurden. Bei den Matrizen Q_1 bis Q_3 und 64 Verschiebungen ist ein deutlicher Anstieg des PSNR zu beobachten. Die zur HRSC äquivalente Q_4 weist ein auffällig höheres PSNR auf, was mit der sehr viel geringeren Komprimierung zu begründen ist. Die erzielte Verbesserung im PSNR ist bei dieser geringen Kompressionsrate nur marginal. Bei den 16 Verschiebungen wurde einfach jede zweite Verschiebung in horizontaler und vertikaler Richtung ausgelassen. Auch hierbei lässt sich eine Verbesserung des PSNR beobachten, wenn auch der Gewinn nicht so hoch wie mit allen 64 Verschiebungen ist. Im simulierten HRSC-Fall ist dagegen keine Verbesserung erzielt worden. Mit 4 Verschiebungen ist nur eine sehr kleine Verbesserung erzielt worden, im Fall von Q_4 ist ein gegenläufiger Effekt zu beobachten.

	Vorher	64	16	4
Q ₁	32,59	0,67	0,46	0,05
Q ₂	29,81	0,94	0,71	0,20
Q ₃	26,71	1,01	0,79	0,29
Q ₄	46,62	0,01	-0,24	-1,09

Tabelle 2: PSNR in [dB] der verschiedenen komprimierten Versionen und die erzielten Verbesserungen in [dB]

Nach der quantitativen Analyse sollen die Ergebnisbilder auch qualitativ beurteilt werden. Dazu sind in Abb. 29 ein Ausschnitt aus dem Lena-Testbild abgebildet, der mit Q₁ komprimiert wurde. In der Abb. 30 ist die aus 64 Verschiebungen rekonstruierte Version zu sehen. Die restlichen Ergebnisse mit den Matrizen Q₂ und Q₃ und den anderen Verschiebungen sind im Anhang A zu finden. Auf die Darstellung der Ergebnisse mit Q₄ wird verzichtet, da visuell kaum Unterschiede auszumachen sind. Es ist zu beachten, dass in der gedruckten Version gegenüber der digitalen Version die Artefakte in den Abbildungen nicht so deutlich zu erkennen sind. Wie in Abb. 30 zu sehen ist, konnten die Blockartefakte mit allen 64 Verschiebungen komplett beseitigt werden. Sowohl glatte Bereiche ohne Textur (Schulterbereich), feine Details mit Kanten (Haare, Federn) und Treppeneffekte (Nase) wurden erfolgreich wiederhergestellt bzw. beseitigt. Es ist also mit diesem Algorithmus über die Mittelung der einzelnen Bilder nicht nur möglich, die Kanten der Kompressionsartefakte zu beseitigen. Gleichfalls können feine Bildstrukturen innerhalb des Blocks wiederhergestellt werden. Auch mit nur 16 Verschiebungen (s. Anhang A) lassen sich bei mittelstarker Kompression (Q₁) die Artefakte beseitigen, wenn auch die Detailgenauigkeit geringer ist. Lediglich 4 Verschiebungen sind nicht ausreichend, denn die Blockartefakte sind noch zu erkennen. Die gleichen Beobachtungen lassen sich auch bei stärkerer Kompression (Q₂ und Q₃) machen, die Übereinstimmung mit dem Original nimmt jedoch erwartungsgemäß ab. Bei nur schwacher Kompression (Q₄) sind keine Blockartefakte zu erkennen, und auch quantitativ (vgl. Tabelle 2) ist keine Verbesserung auszumachen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass auch bei extrem starker Kompression eine Verbesserung erzielt werden kann. Für eine optimale Rekonstruktion sollten alle 64 Verschiebungen berechnet werden, bei niedriger Kompression scheint die Rekonstruktion nicht nötig zu sein bzw. ergibt keine Verbesserung.



Abb. 29: Mit Q₁ komprimierte Version



Abb. 30: Rekonstruierte Version aus 64 Verschiebungen

5.1.2.2 Evaluierung mit HRSC-Bildern

Abschließend soll nun noch die praktische Anwendung mit HRSC-Daten untersucht werden. Während der gesamten Mission wurde bislang nur ein Bildstreifen (h3036_0000) ohne Kompression aufgenommen, so dass dieser für diese Untersuchung verwendet wird. Wie im vorherigen Beispiel wird bei den Bildern eine Kompression simuliert, wobei sich diesmal auf die Quantisierung, die der Prozessierung in der HRSC entspricht, beschränkt wird. Wie schon beim ersten Test lässt sich durch die Rekonstruktion nur eine sehr kleine Verbesserung beim PSNR erzielen (Tabelle 3).

Bild	Vorher	Verbesserung
h3036_0000.nd2.03	48,14	0,02
h3036_0000.p12.03	46,33	0,20
h3036_0000.p22.03	46,62	0,00
h3036_0000.s12.03	45,34	0,18
h3036_0000.s22.03	45,75	0,07

Tabelle 3: PSNR in [dB] aus Original und komprimierten Bild (Vorher) und Original und aus 64 Verschiebungen rekonstruierter Version (Nachher)

Nun soll noch untersucht werden, ob die Rekonstruktion der Bilder einen signifikanten Einfluss auf die Punktextraktion hat. Dazu wird mit drei ausgewählten Bildstreifen jeweils ein DGM aus den Originaldaten und den rekonstruierten Daten erzeugt. Bei Streifen h3036_0000 können sogar drei Varianten (Originaldaten, komprimierte Daten, rekonstruierte Daten) berechnet werden. Die Erzeugung der DGMs erfolgt nach dem in (Scholten et al. 2005) beschriebenen Verfahren mit verbesserter Äußerer Orientierung (Schmidt et al. 2005, Spiegel et al. 2005). Als weitere Testdatensätze werden Bildstreifen h1235_0001, welcher in einigen texturarmen Bereichen wegen Staub in der

Atmosphäre Blockartefakte enthält, und h2032_0001, welcher trotz recht guter Bildqualität in texturarmen Bereichen Blockartefakte aufweist (s. Abb. 31), verwendet.



Abb. 31: Zweifach vergrößerter Ausschnitt aus Bildstreifen h2032_0001. Zur Betonung der Kompressionsartefakte wurde der Kontrast verstärkt.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse für den Bildstreifen h3036_0000 dargestellt. Es sind sowohl die Schnittpunktfehler im Objekt aus dem Vorwärtsschnitt gemittelt über alle Punkte und über X, Y, Z angegeben als auch die absolute und relative Punktanzahl in Prozent. Beide Angaben wurden noch nach Anzahl der Strahlen aufgeteilt, aus denen die Tupel bestehen. Die Schnittpunktgenauigkeit hat in der komprimierten Version etwas abgenommen, die Größenordnung liegt allerdings im Bereich von 0,05 Pixeln des in der Zuordnung verwendeten Bildmaßstabs. Es wurden weniger Punkte generiert und das Verhältnis der 5-Strahlpunkte an der Gesamtanzahl aller Tupel hat ein wenig abgenommen. Die Bearbeitung mit dem vorgestellten Algorithmus hat also keine signifikante Verbesserung herbeigeführt, allerdings ist die Gesamtanzahl der Punkte minimal gestiegen.

	Original		Komprimiert		Rekonstruiert	
2-Strahl	28,45 m	4,51%	27,43 m	6,03%	27,23 m	6,01%
3-Strahl	24,73 m	13,88%	29,20 m	14,47%	28,77 m	14,51%
4-Strahl	24,15 m	9,44%	26,65 m	10,37%	26,95 m	10,42%
5-Strahl	12,59 m	71,18%	14,23 m	69,13%	14,29 m	69,06%
Gesamt	16,08 m	100,0%	18,48 m	100,0%	18,49 m	100,0%
Gesamtanzahl	2059718		1919716		1922363	

Tabelle 4: Ergebnisse mit Streifen h3036_0000. Es wurden die Originaldaten, Daten mit simulierter Kompression und daraus rekonstruierte Versionen verwendet. Die erste Zahl gibt jeweils den Schnittpunktfehler aus dem Vorwärtsschnitt gemittelt über alle Punkte und über X, Y, Z in Metern an. Diese Werte sind aufgeteilt nach 2-, 3-, 4- und 5-Strahlpunkten dargestellt. Der zweite Wert gibt jeweils den prozentualen Anteil an der Gesamtpunktzahl an.

Für den Bildstreifen h1235_0001 lässt sich Ähnliches beobachten (s. Tabelle 5). Hier liegt allerdings kein Ergebnis mit unkomprimierten Bildern vor. Dafür wurde zusätzlich neben dem Quantisierungsfaktor 4 (Vers. 1) auch eine Variante mit Faktor 8 (Vers. 2) gerechnet, um eine stärkere Glättung zu erzielen. Durch die stärkere Glättung wurden mehr Punkte generiert, ansonsten ist keine signifikante Änderung feststellbar. Die gleichen Beobachtungen sind mit dem Testdatensatz h2032_0001 zu machen (s. Tabelle 6).

	Original		Vers. 1		Vers. 2	
2-Strahl	108,69m	9,39%	108,78m	9,35%	109,17m	9,47%
3-Strahl	78,72m	12,51%	78,72m	2,57%	78,76m	12,69%
4-Strahl	64,84m	13,40%	65,07m	13,41%	64,87m	13,72%
5-Strahl	26,17m	64,71%	26,67m	64,66%	26,57m	64,12%
Gesamt	46,02m	100,0%	46,04m	100,0%	46,27m	100,0%
Gesamtanzahl	2 298 631		2 299 084		2 350 720	

Tabelle 5: Ergebnisse mit Streifen h1235_0001. Version 1 wurde mit einem Quantisierungsfaktor von 4 und Version 2 mit einem Faktor von 8 gerechnet.

	Original		Vers. 1		Vers. 2	
2-Strahl	15,02m	6,25%	14,99m	6,25%	15,45m	6,12%
3-Strahl	12,05m	10,22%	12,01m	10,22%	11,95m	10,49%
4-Strahl	9,66m	10,88%	9,69m	10,88%	9,95m	11,02%
5-Strahl	6,77m	72,65%	6,77m	72,65%	6,89m	72,37%
Gesamt	8,14m	100,0%	8,14m	100,0%	8,28m	100,0%
Gesamtanzahl	7 799 728		7 799 920		7 873 754	

Tabelle 6: Ergebnisse mit Streifen h2032_0001

Insgesamt lässt sich als Fazit sagen, dass bei nur geringer Kompression mit dem beschriebenen Algorithmus keine Verbesserung der automatischen Punktextraktion zu erzielen ist. Dies hatte sich bei den ersten Untersuchungen mit dem Lena-Testbild bereits angedeutet. Die Kompressionsrate bei HRSC-Bildern ist bei guter Bildqualität allerdings niedrig, und es sind so gut wie keine Artefakte sichtbar, so dass bei der automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten keine signifikante Verschlechterung eintritt. Stärkere Kompressionsartefakte als in den ausgewählten Beispielen treten nur in Bildern mit schlechterer Bildqualität (Staubstürme) auf, die allerdings weder für eine photogrammetrische Prozessierung noch für eine geologische Interpretation zu gebrauchen sind. Auf eine Verarbeitung der Bilder mit dem beschriebenen Algorithmus wird daher bei der systematischen Prozessierung verzichtet.

5.1.2.3 Anwendung auf Farbkanäle

In Abb. 32 ist die Kompressionsrate als Verhältnis zwischen unkomprimierter und komprimierter Bildgröße für den jeweiligen Nadirkanal über alle verfügbaren Datensätze dargestellt. Es sind ausschließlich Bildstreifen aufgeführt, die zu Kartierungszwecken aufgenommen wurden. Aufnahmen von den beiden Monden oder Limb-Aufnahmen sind nicht enthalten. Es sind allerdings noch einige unkomprimierte Systemtestbilder enthalten, in denen nur der Nadirkanal aufgenommen wurde. Die Diagramme für die restlichen acht Kanäle sind im Anhang B abgebildet. Im Nadirkanal liegt die Rate immer unter 10:1, nur bei Staubstürmen oder fehlerhaften Daten liegt sie darüber. Bei den beiden Stereokanälen ist die Rate ein wenig höher, im Durchschnitt liegen Werte um 10:1 vor. Der Photometrikanal P2 liegt ebenso in diesem Bereich, wenn auch der Anteil der Ausreißer nach oben etwas höher liegt. Aus ungeklärten Gründen sind die Kompressionsraten für den Photometrikanal P1 deutlich breiter gestreut. In den vier Farbkanälen liegt sie ebenso immer deutlich höher, was auch schon in (McCord et al. 2007) beobachtet wurde.

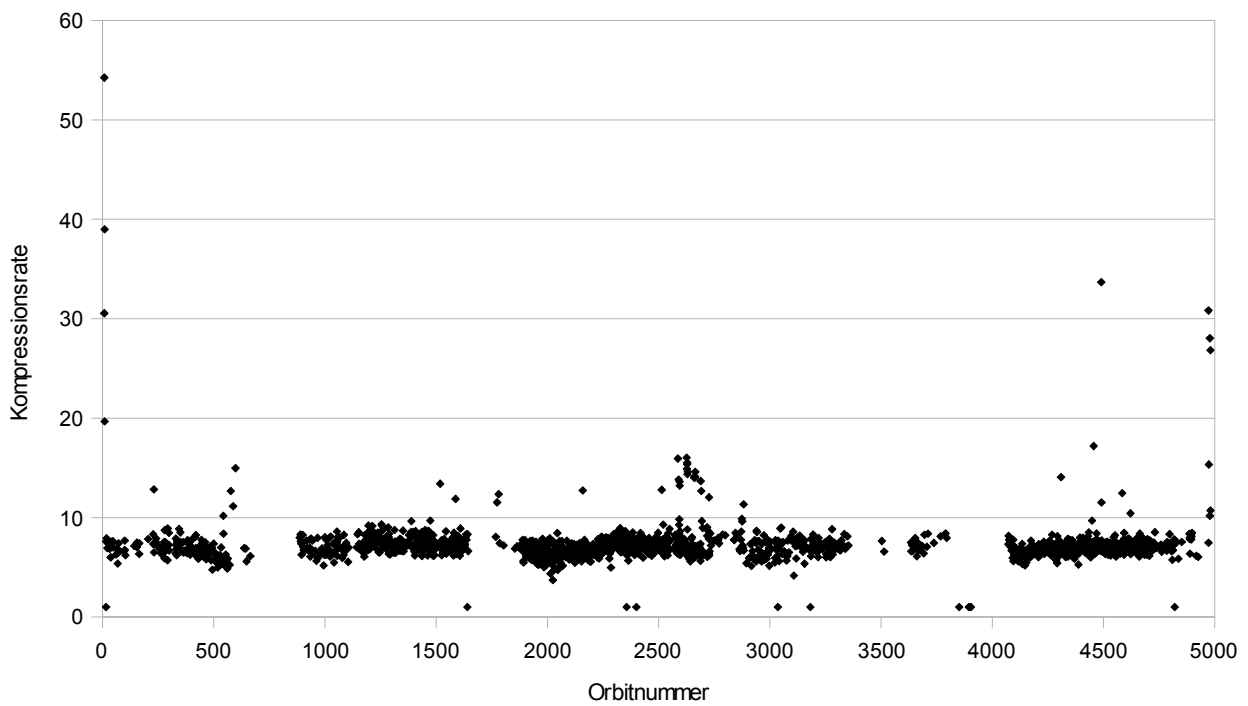


Abb. 32: Kompressionsrate über alle Bildstreifen im Nadirkanal

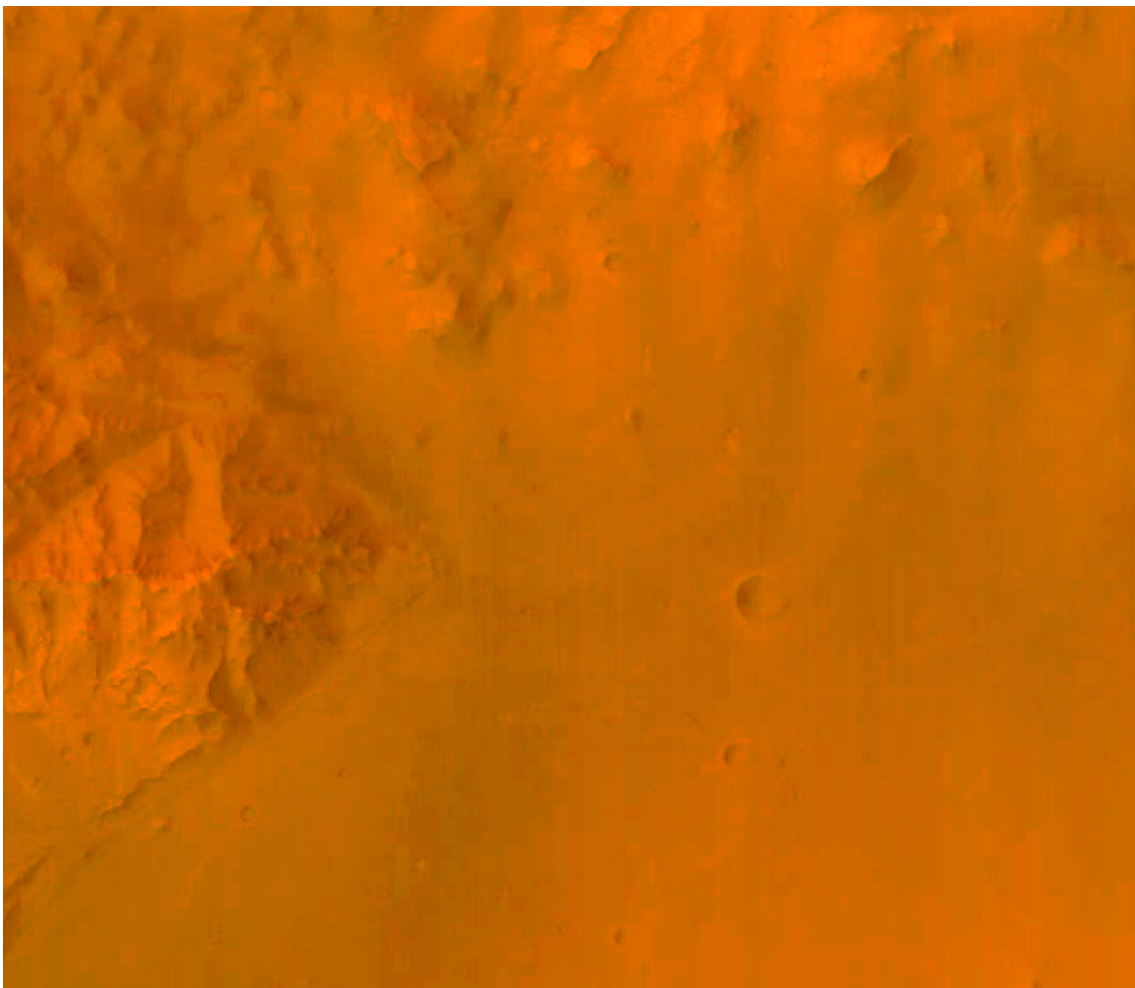


Abb. 33: Kontrastverstärkter Ausschnitt aus orthorektifizierten Farbkanälen des Streifens h0018_0000, erstellt aus den Originaldaten

Der Algorithmus wird daher noch auf die Farbkanäle am Beispiel von Bildstreifen h0018_0000 angewandt. In Abb. 33 ist ein kontrastverstärkter Ausschnitt aus den orthorektifizierten Originaldaten zu sehen. Es sind Blockstrukturen sichtbar, die von den Kompressionsartefakten stammen. Nach der Bearbeitung der Bilder mit dem Algorithmus sind die Blockstrukturen beseitigt bzw. gemindert worden (Abb. 34). Für die Erzeugung der Verknüpfungspunkte werden normalerweise nur die fünf panchromatischen Kanäle benötigt, womit geometrisch ausreichend stabile Ergebnisse erzielt werden. Außerdem ist die Auflösung bedingt durch die Datenreduktion von oftmals MPF 8 gegenüber dem Nadirkanal und den Stereokanälen zu gering für hochgenaue Punkte. Die restaurierten Farbkanäle lassen sich dennoch in Verbindung mit Pansharpenering für qualitativ hochwertige Farbborthophotos verwenden.

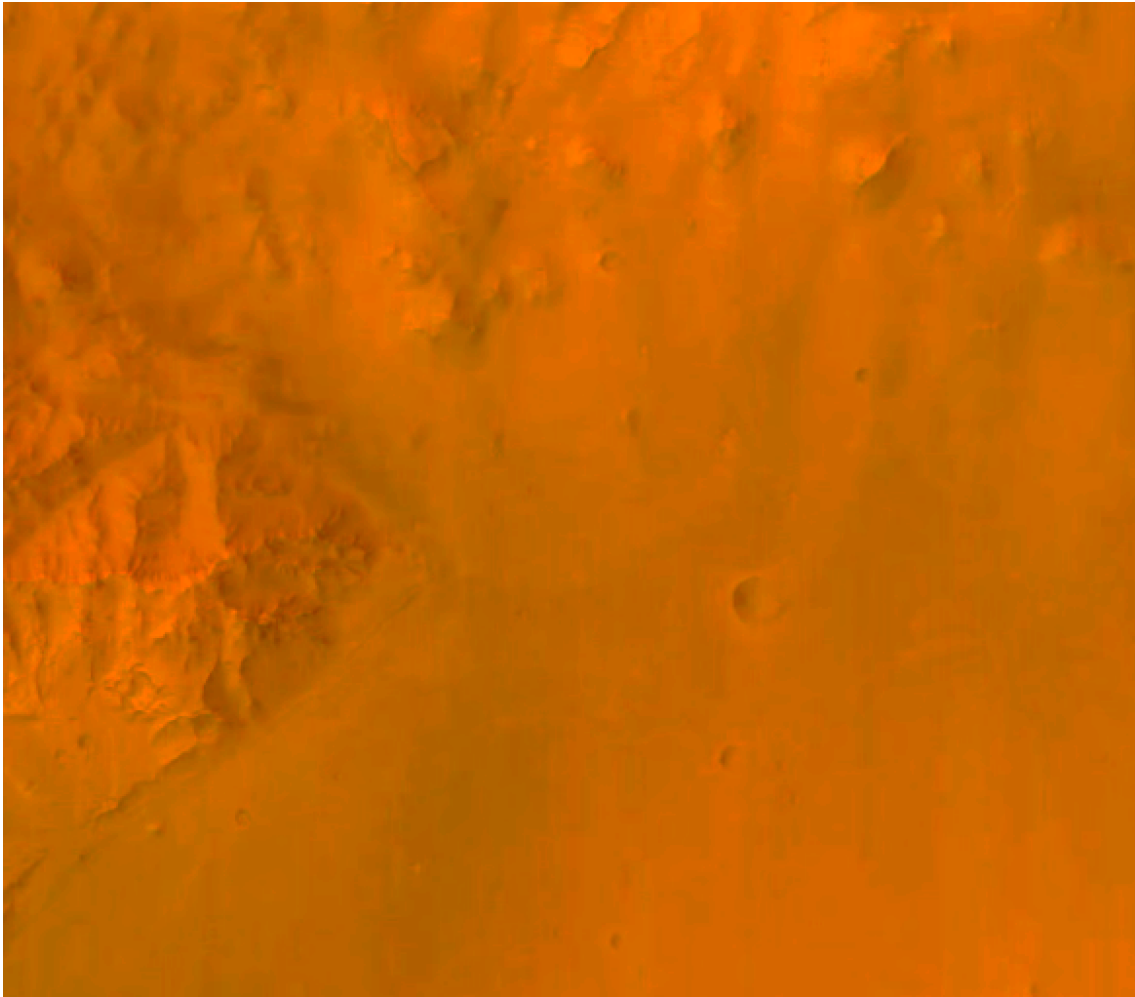


Abb. 34: Kontrastverstärkter Ausschnitt aus orthorektifizierten Farbkanälen des Streifens h0018_0000, erstellt aus restaurierten Bilddaten

5.1.3 Reduzierung von Bildrauschen

Die einzelnen Rauschanteile in HRSC-Bildern wurden bereits in 5.1.1 behandelt. In diesem Abschnitt werden die beiden Rauschunterdrückungsalgorithmen Anisotrope Diffusion und NL Means, die in 3.2.3 und 3.2.4 vorgestellt wurden, zusammen mit einem Gauß-Filter anhand des Lena-Testbildes und von HRSC-Daten evaluiert.

5.1.3.1 Evaluierung mit Testbildern

Die Berechnung des Mittelwerts der Standardabweichung, die als Nutzsignalleistung betrachtet wird (s. Formel 49) über alle für Kartographiezwecke aufgenommenen Nadirkanäle hat einen recht niedrigen Wert von etwas über 7 Pixel ergeben. Problematisch bei den HRSC-Daten ist also nicht die Höhe des Rauschens, sondern das niedrige SNR. Für

diese Untersuchung wird das Lena-Testbild, das eine Standardabweichung von 52,9 besitzt, zunächst mit additiven weißen Gaußschen Rauschen der Standardabweichung 20 überlagert, womit ein mit den HRSC-Daten vergleichbares SNR geschaffen wird. Das Bild wird mit den drei Algorithmen Gaußfilter (s. Formel 13), Robuste Anisotrope Diffusion (s. 3.2.3) und NL Means (s. 3.2.4) entrauscht, und die Ergebnisse werden untereinander quantitativ und qualitativ verglichen.

In Abb. 35 sind das verrauschte Ausgangsbild und die Ergebnisbilder des jeweiligen Algorithmus dargestellt. Es wurden zahlreiche Parametereinstellungen der einzelnen Algorithmen ausprobiert, es wird hier aber nur das (nach Meinung des Autors) visuell beste Ergebnis präsentiert. Als Kriterium diente dabei der Gesamteindruck des Ergebnisbildes bezüglich Kantenschärfe, Glattheit in homogenen Bereichen und verbliebenem Rauschanteil. Links oben befindet sich das verrauschte Lena-Bild. Rechts oben befindet sich das Ergebnis, welches mit einem Gauß-Filter mit der Fenstergröße 15×15 Pixel erzielt wurde. In der unteren Zeile ist links das Ergebnis der Robusten Anisotropen Diffusion dargestellt. Es wurde ein automatisch berechnetes σ_g (s. Formel 22) von 53,5 verwendet und insgesamt 15 Mal iteriert. Das letzte Bild unten rechts zeigt das Ergebnis nach einer NL Means-Filterung mit $t=7, f=4$ und $h=225$.



verraushtes Bild



Gauß-Filter



Anisotrope Diffusion

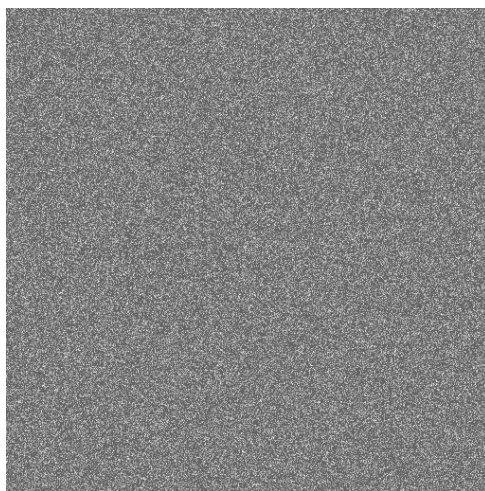


NL Means

Abb. 35: Vergleich der verschiedenen restaurierten Versionen

Wie es zu erwarten war resultieren aus der Gauß-Filterung verschwommene Kanten, was bei der Bestimmung der Verknüpfungspunkte zu einer Unsicherheit in der Position der Verknüpfungspunkte führen kann. Bei der Robusten Anisotropen Diffusion wurde die Kantenschärfe viel besser erhalten; texturarme Bereiche sind allerdings nicht vollkommen glatt wiederhergestellt worden. Die NL Means-Filterung erzielt qualitativ die besten Ergebnisse. Es bleiben feine Details erhalten, und texturarme Flächen sehen sehr glatt aus. Es sind allerdings trotzdem an manchen Stellen kleine Artefakte zu beobachten.

Als zweiten Teil dieses qualitativen Vergleichs wird das Ergebnisbild vom Originalbild abgezogen. Im Idealfall enthält das Differenzbild ausschließlich Rauschen und keine Bilddetails. In Abb. 36 links oben ist dieses Idealbild aus der Differenz zwischen Originalbild und verrauschter Version abgebildet. Die Differenz zum Gauß-gefilterten Bild ist rechts oben dargestellt. Die Kanten sind sehr deutlich zu sehen, d. h. sie werden stark gefiltert. Bei Robuster Anisotroper Diffusion sind die Restkanten deutlich geringer, manche sind sogar fast nicht zu erkennen. Der NL Means-Algorithmus kommt dem Idealergebnis noch etwas näher, obwohl auch hier noch Bilddetails zu erkennen sind. Insgesamt betrachtet bestätigen die Differenzbilder die Beobachtungen aus dem vorherigen Absatz, wobei der NL Means-Algorithmus am besten abschneidet.



Rauschen



Gauß-Filter



Anisotrope Diffusion



NL Means

Abb. 36: Differenz zwischen Originalbild und entrauschten Versionen

Neben dem visuellen Vergleich sollen die Bilder auch noch quantitativ beurteilt werden. Zu dem Zweck wird das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zwischen dem Originalbild und den entrauschten Bildern berechnet (s. Formel 49). Als Nutzsignalleistung wird die empirische Standardabweichung des unverrauschten Originalbildes verwendet. Die Rauschleistung entspricht der Standardabweichung des Differenzbildes aus Original- und entrauschem Bild. Zum

Vergleich ist in der ersten Spalte von Tabelle 7 noch das SNR zwischen dem Originalbild und dem verrauschten Bild angegeben. So lässt sich beobachten, dass man das SNR mit allen vier Methoden deutlich anheben kann. Die beiden kantenerhaltenden Methoden schneiden dabei besser als die Gauß-Filterung ab, wobei der NL Means-Filter auch hier als beste Methode hervorgeht. Es muss allerdings noch bemerkt werden, dass die hier angegebenen Werte zu den Bildern aus Abb. 35 gehören, die nach visuellen Kriterien ausgesucht worden sind. Es ist möglich, dass Ergebnisbilder mit anderen Parametereinstellungen höhere SNR-Werte erzielen können. Insgesamt betrachtet werden aber die Ergebnisse der qualitativen Untersuchung bestätigt.

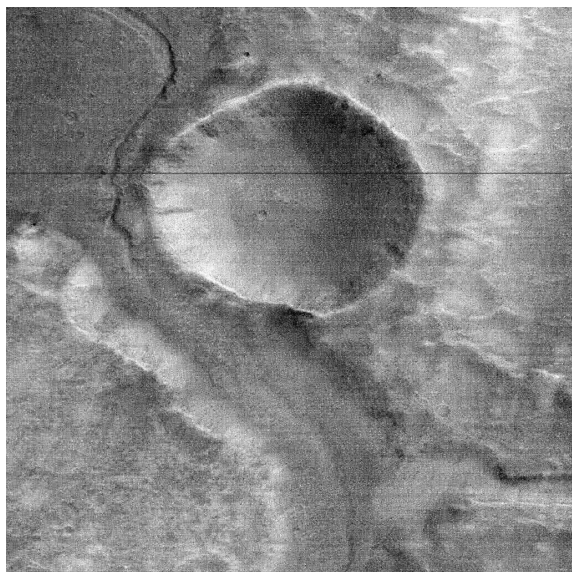
Für die operationelle Verarbeitung der HRSC-Daten ist noch die Rechenzeit von Interesse. In der zweiten Zeile sind die ungefähren Rechenzeiten einer Matlab-Implementierung dokumentiert. Hier zeigt sich, dass die Gauß-Filterung das Ergebnisbild ungefähr um den Faktor 10 schneller liefert als die Anisotrope Diffusion. Der NL Means-Algorithmus benötigt für das 512×512 Pixel große Bild im Durchschnitt ca. 1200 Sekunden und ist somit über tausendmal langsamer als die Anisotrope Diffusion. Da die Rechenzeit mit steigender Bildgröße exponentiell wächst, würde selbst bei einer schnellen Implementierung die Prozessierung eines großen HRSC-Bildes mit 100 000 Zeilen bei aktuellen Rechnern mehrere Tage dauern. NL Means ist somit für eine operationelle Prozessierung hunderter großer Bilder nicht geeignet.

	Verrauschtes Bild	Gauß-Filter	Aniso. Diff.	NL Means
SNR	8,90	13,39	15,39	17,34
Rechenzeit		0,1 s	1,0 s	1200 s

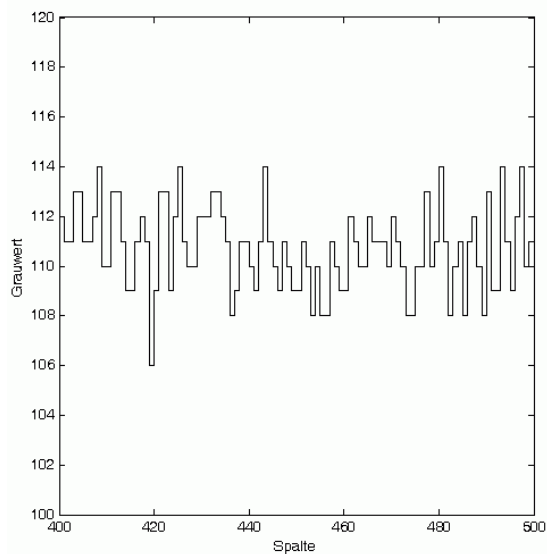
Tabelle 7: SNR in [dB] und Rechenzeit der drei getesteten Algorithmen

5.1.3.2 Evaluierung mit HRSC-Bildern

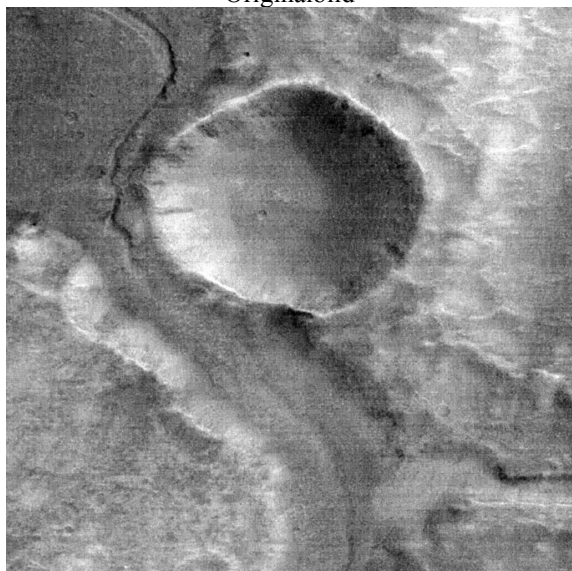
Neben dem Lena-Testbild sollen die Algorithmen ihre Leistungsfähigkeit auch mit realen HRSC-Daten unter Beweis stellen. Dazu wird ein Ausschnitt aus Streifen h0047_0000 herangezogen, der in weiten Teilen einen geringen Kontrast und viel Rauschen aufweist. Ein Vergleich mit einer unverrauschten Version des Bildes ist hier allerdings natürlich nicht möglich. Es wurde wieder das visuell beste Ergebnis für den Vergleich ausgewählt. In Abb. 37 ist links oben das Originalbild und rechts daneben ein Plot der Grauwerte aus Zeile 300 dieses Bildes dargestellt, um den geringen Grauwertumfang zu demonstrieren. Die Zeile ist im linken Bild mit einem schwarzen Strich markiert. Das gesamte Bild hat einen Mittelwert von 111,3 mit einer Standardabweichung von 3,1 Pixeln. Der Kontrast wurde zur Visualisierung stark erhöht. In der mittleren Zeile ist links die Gaußsche Variante mit einem 5×5 Fenster abgebildet, wobei andere Fenstergrößen das Ergebnis nur wenig verändert haben. Rechts davon ist die Robuste Anisotrope Diffusion nach drei Iterationen abgebildet. In der unteren Zeile sind schließlich zwei Ergebnisse aus dem NL Means-Algorithmus zu sehen. Die ersten beiden Ergebnisse unterscheiden sich visuell kaum, mit NL Means sind jedoch insbesondere bei der ersten Variante Artefakte zu beobachten. Der Parameter für die Gewichtung der Rauschunterdrückung h musste auf ein Zehntel genau eingestellt werden, sonst war das Ergebnis völlig unzureichend: Bei der linken Variante kann man erkennen, dass sich zahlreiche Gebiete gleichen Grauwerts gebildet haben. Die rechte Variante zeigt das beste erzielbare Ergebnis, aber im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren sind auch hier Artefakte zu beobachten. Beim Lena-Testbild war die Wahl des Parameters h nicht kritisch, und eine Variation von ± 5 veränderte das Ergebnis nicht wesentlich. Die Rechenzeit der ersten beiden Algorithmen hat sich gegenüber der vorherigen Untersuchung aus Abschnitt 5.1.3.1 nicht grundsätzlich verändert, während die NL Means-Variante durchschnittlich bereits 5000 Sekunden für das 1024×1024 Pixel große Bild benötigte. Mangels unverrauschem Referenzbild wird hier auf die Angabe des SNR verzichtet. Die ersten beiden Algorithmen konnten das Rauschen deutlich verringern, wobei kein eindeutiger Favorit auszumachen ist. Der NL Means-Algorithmus konnte bei diesen kritischen HRSC-Daten nicht so gut wie zuvor abschneiden, so dass er, auch aufgrund der sehr langen Rechenzeiten, für die operationelle Verarbeitung der HRSC-Daten nicht in Frage kommt. Die Vorteile der kantenerhaltenden anisotropen Filterung gegenüber der Gauß-Filterung ist nur bei guter Bildqualität offensichtlich. Bei den HRSC-Daten sind in diesem Fall mit viel Rauschen und geringem Kontrast zwischen den beiden Varianten aus Gauß-Filterung und Anisotroper Diffusion kaum Unterschiede auszumachen.



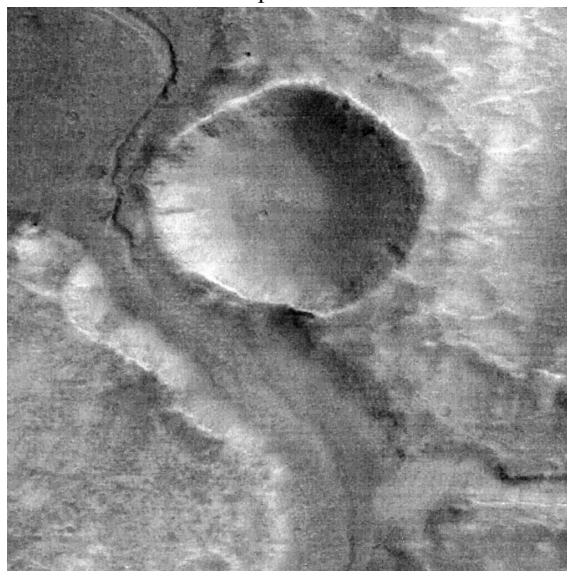
Originalbild



Grauwertprofil Zeile 300



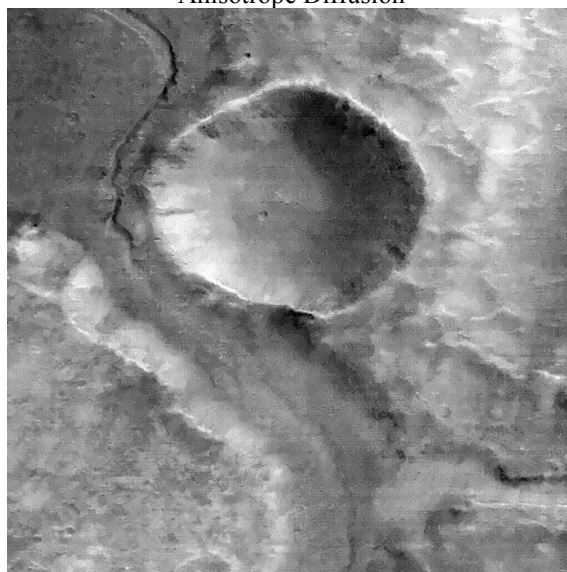
Gauß-Filter



Anisotrope Diffusion



NL Means Variante 1



NL Means Variante 2

Abb. 37: Gefilterte Versionen des Ausschnitts aus h0047_0000, Kontrast wurde erhöht

Nun wird die Filterung noch anhand von 45 ausgewählten Bildstreifen (mehr dazu in 5.2.2) in der praktischen Anwendung evaluiert. Dazu werden mit dem in dieser Arbeit entwickelten Zuordnungsverfahren (s. 4.3) Verknüpfungspunkte generiert und mit der Bündelausgleichung (s. 4.4) bezüglich Punktzahl und -genauigkeit evaluiert. Die Mittelwerte der Ergebnisse über alle 45 Bildstreifen sind in den Tabellen 8 und 9 dargestellt. Die Ergebnisse für jeden einzelnen Bildstreifen sind im Anhang C in den Tabellen 21 und 22 zu finden. Es wurden drei Varianten mit jeweils identischen Parametern gerechnet: Ohne Filterung, Filterung mit Anisotroper Diffusion, Filterung mit 3×3 Gauß-Filter. Die erste Zahl in Tabelle 8 gibt jeweils die von der Zuordnung gelieferte die Punktzahl wieder, und die zweite gibt die letztendlich von der Bündelausgleichung genutzten Punkte an. Die Differenz ergibt sich aus der Tatsache, dass in der Bündelausgleichung mindestens Dreistrahlpunkte verwendet werden, d.h die Zweistrahlpunkte werden von vornherein ausgeschlossen. Weiterhin werden über eine Grobfehlersuche Punkte eliminiert. Die Quote in Prozent der eliminierten Punkte an der Gesamtpunktzahl ergibt die dritte Zahl.

ohne Filterung			Anisotrope Filterung			Gauß-Filterung		
Nach Zuordnung	Nach BA	Anteil elim. Punkte [%]	Nach Zuordnung	Nach BA	Anteil elim. Punkte [%]	Nach Zuordnung	Nach BA	Anteil elim. Punkte [%]
27698	22412	11,8	40990	34750	10,4	41614	35166	10,8

Tabelle 8: Punktzahlen ungefilterter und gefilterter Bilder

Zwischen der Anisotropen Diffusion und dem Gaußschen Filter gibt es keinen nennenswerten Unterschied in der Punktzahl, auch der Anteil der eliminierten Punkte ist in etwa gleich. Im Vergleich zum ungefilterten Datensatz konnten im Mittel über alle 45 Streifen fast 50% mehr Punkte generiert werden.

X [m]			Y [m]			Z [m]		
Ungefiltert	Anisotrop	Gauß	Ungefiltert	Anisotrop	Gauß	Ungefiltert	Anisotrop	Gauß
4,5	5,3	4,8	3,4	4,0	3,6	15,8	18,4	16,6

Tabelle 9: Punktgenauigkeiten ungefilterter und gefilterter Bilder

In Tabelle 9 sind die Theoretischen Standardabweichungen der Punkte aus dem Vorwärtsschnitt der endgültigen Punkte dargestellt. Die erste Zahl bezieht sich auf den ungefilterten Datensatz, die zweite auf den Datensatz Anisotrope Diffusion, und die dritte bezieht sich auf die Bilder, welche mit dem 3×3 Gauß-Filter prozessiert wurden. Die Koordinaten beziehen sich auf ein lokales System, in dem der Z-Wert die Höhenkomponente angibt. Am Mittelwert ist zu erkennen, dass sich durch die Filterung die Genauigkeit ein wenig verschlechtert. Die in den vorherigen Untersuchungen festgestellten Vorteile der Anisotropen Diffusion bezüglich kantenerhaltender Wirkung konnten im praktischen Einsatz mit HRSC-Daten nicht bestätigt werden, denn die Genauigkeit ist im Vergleich zum Gauß-Filter geringfügig schlechter. Hierbei sollte allerdings berücksichtigt werden, dass sich die Werte bezogen auf eine mittlere Auflösung von 30m der entzerrten Bilder in der Lage um etwa $1/46$ Pixel und in der Höhe um $1/13$ Pixel verschlechtert haben, was im Rahmen der Standardprozessierung letztlich vernachlässigt werden kann.

In (Gwinner et al. 2005) werden die HRSC-Bilder mit einer ortsvarianten Version des Gauß-Filters bearbeitet. Die Größe der Filtermatrix wird bei diesem Verfahren anhand der Textur im Bild variiert. Als Maß dafür wird in einem zu definierenden Ausschnitt die Entropie verwendet. Bei niedriger Entropie wird von einem relativ texturarmen Bereich ausgegangen, und die Filtermatrix wird vergrößert. Untersuchungen, welche in (Schnitger 2007) bestätigt wurden, haben gezeigt, dass mit einer stärkeren Filterung eine höhere Anzahl Punkte extrahiert werden können. Dies ist für eine lückenlosen Abdeckung zur DGM-Erzeugung notwendig. Bei der Bestimmung von Verknüpfungspunkten in dieser Arbeit sind die Punktabstände aber deutlich größer, und einige Lücken kann die anschließende Bündelausgleichung ohne Einschränkungen verarbeiten. In (Schnitger 2007) konnte festgestellt werden, dass bei stärkerer Filterung die Punktgenauigkeit sinkt. Stärkere Filterung bedeutet bei der Anisotropen Diffusion mehr Iterationen und höhere Schwellwerte für die Kantendetektion (Formel 22) und beim Gauß-Filter größere Fenster. Zugunsten einer höheren Punktgenauigkeit wird im Vergleich zur ortsvarianten Filterung bei (Gwinner et al. 2005) mit einer ortsinvarianten Filterung mit der kleinstmöglichen Matrixgröße von 3×3 gefiltert. Da die Anisotrope Diffusion gegenüber dem Gauß-Filter keinen signifikanten Vorteil erzielen konnte und wegen der unkomplizierten Anwendung des Gauß-Filters, d. h. es müssen keine weiteren Parameter eingestellt werden, wird dieser schließlich in der Standardprozessierung verwendet.

Als wichtiges Ergebnis dieser Untersuchung bleibt festzuhalten, dass mit der Bildfilterung im Durchschnitt fast 50% mehr Punkte gegenüber der ungefilterten Variante generiert werden. Dies führt wegen der gleichmäßigeren Abdeckung

mit Punkten zu einer zuverlässigeren Anpassung an das MOLA-DGM zur Absoluten Orientierung (s. 4.4). Bei der Absoluten Orientierung wird jeweils ein Bias in X, Y und Z sowie eine Drift in Z geschätzt, deren Standardabweichungen gemittelt über alle 45 Streifen in Tabelle 10 zu sehen sind. Auch an diesen Zahlen ist zu erkennen, dass die Absolute Orientierung mit einer gleichmäßigeren Punktabdeckung zuverlässiger bzw. genauer erfolgt, denn der Bias und die Drift lassen sich etwas genauer schätzen.

Method	Bias X [m]	Bias Y [m]	Bias Z [m]	Drift Z [m]
Ungefiltert	13,3	17,2	6,7	11,7
Anisotrope Diffusion	11,9	14,8	5,7	9,8
Gauß-Filter	11,8	14,7	5,3	9,2

Tabelle 10: Theor. Standardabweichung des Bias in X, Y und Z und der Drift in Z gemittelt über alle 45 Bildstreifen

In Grenzfällen kann die Punktzahl bzw. -abdeckung darüber entscheiden, ob die Bündelausgleichung erfolgreich ist oder nicht (Schmidt 2006). Dazu wird als letztes Beispiel der Streifen h2315_0000 untersucht, der recht stark verrauscht ist. Ohne Filterung werden lediglich 8924 Punkte gefunden, von denen in der Bündelausgleichung abzüglich Zweistrahlpunkte und grober Fehler letztendlich 7253 verwendet werden. Für eine gleichmäßige Abdeckung des Zielgebietes sind das zu wenig Punkte. Mit Bildfilterung werden insgesamt 27 259 Punkte generiert, wovon 23 234 in der Bündelausgleichung verwendet werden. Dies entspricht einer Steigerung der Punktzahl von über 200%. In Abb. 38 ist die Punktverteilung für einen Ausschnitt vom nördlichen Rand dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass ohne Filterung sehr große Lücken vorhanden sind, die mit der Filterung geschlossen werden können.

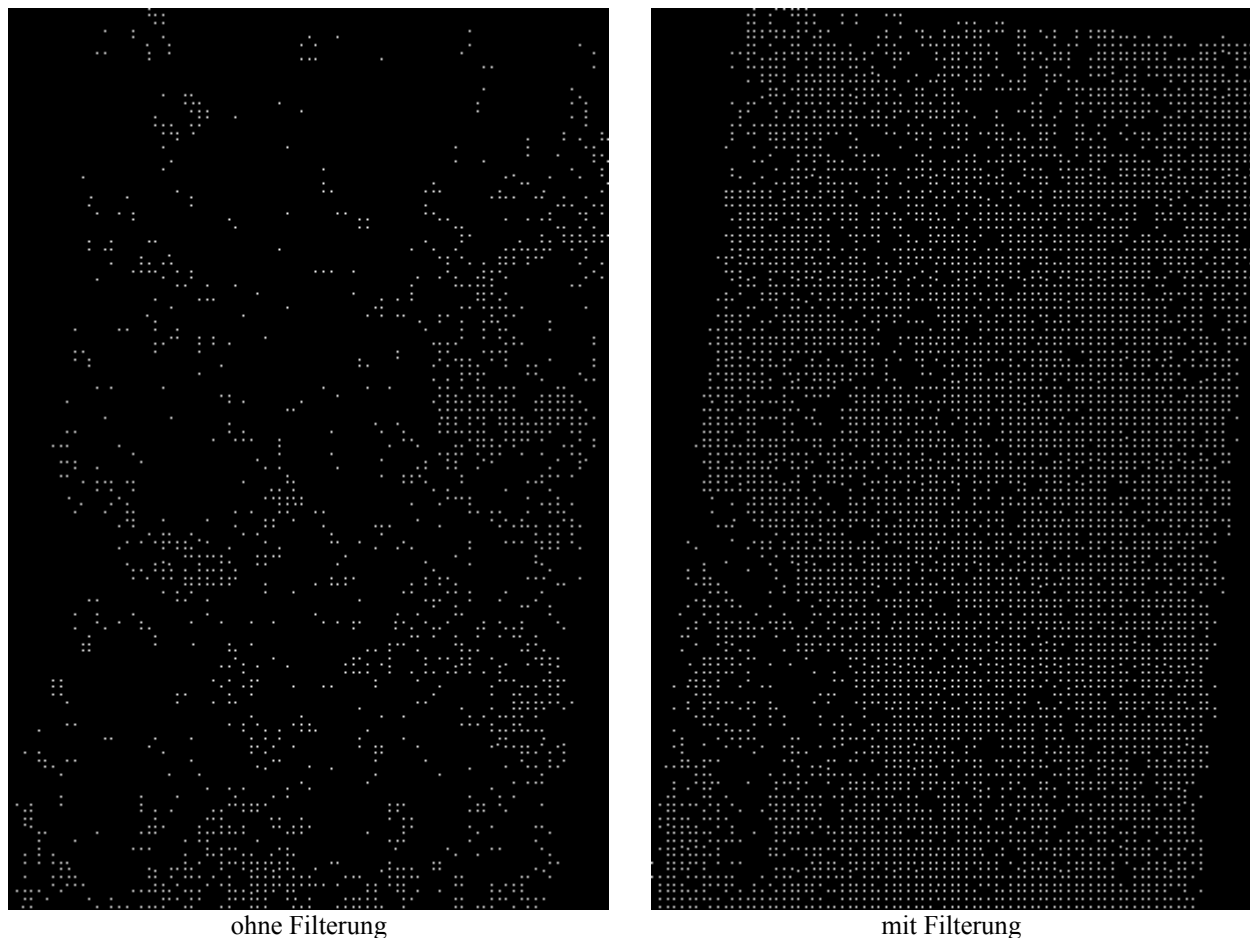


Abb. 38: Ausschnitt aus Punktverteilung in h2315_0000 ohne und mit Filterung

Die Auswirkung auf die Absolute Orientierung ist in Abb. 39 dargestellt, die die Differenzen der erzeugten Punkte zum MOLA-DGM zeigt. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Anpassung mit zu wenigen Punkten unsicherer ist. Insgesamt betrachtet ist eine Filterung oftmals sinnvoll; die minimale Verschlechterung der Theoretischen Standardabweichung der Punkte nach dem Vorwärtsschnitt durch die Filterung kann dabei in Kauf genommen werden, zumal die Verschlechterung nur einen kleinen Bruchteil eines Pixels ausmacht.

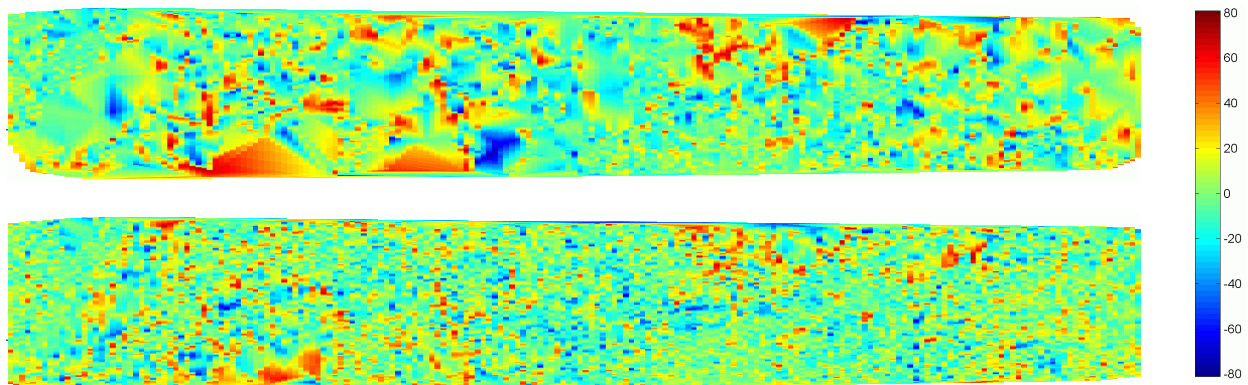


Abb. 39: Differenzen in [m] zum MOLA-DGM ohne (oben) und mit (unten) Filterung

5.2 Prozessierung von Einzelstreifen

5.2.1 Konzept

Nachdem in den vorherigen Abschnitten 4.2 und 4.3 der grundsätzliche Ablauf der Prozessierung und die theoretische Funktionsweise des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Zuordnungsverfahrens beschrieben wurde, soll hier nun die praktische Anwendung mit HRSC-Daten untersucht werden. Bei der großen Zahl an zu prozessierenden Bildstreifen kann nicht jeder individuell bearbeitet werden, um so ein möglichst optimales Ergebnis zu erzielen. Es ist vielmehr das Ziel, ein sinnvolles Konzept und einen robusten Parametersatz zu finden, mit denen für alle Bildstreifen ein gutes aber möglicherweise nicht optimales Ergebnis erreicht wird.

Zunächst muss darüber entschieden werden, welche Einzelbilder eines Streifens einander zugeordnet werden sollen. Aufgrund verschiedener Aufnahme Konfigurationen ist es nicht sinnvoll, immer alle neun Bilder zu verwenden. Davon abgesehen, dass nicht in jedem Fall alle neun Kanäle Daten aufnehmen, ist die Auflösung der vier Farbkanäle oftmals mit einem MPF von 8 zu niedrig gegenüber den anderen. Hinzu kommt, dass die Farbkanäle andere radiometrische Eigenschaften haben als die fünf panchromatischen Kanäle (s. Abb. 12) und häufig im Verhältnis zu diesen einen geringeren Kontrast und hohe Kompressionsraten aufweisen (s. Anhang B). Es wird hier davon ausgegangen, dass im Normalfall bei der operationellen Prozessierung nur die fünf panchromatischen Kanäle verwendet werden. Ausnahmen können z.B. auftreten, wenn die Photometrie Kanäle nicht vorliegen oder die Farbkanäle eine ausreichend hohe Auflösung von MPF 4 besitzen. Die optimale MPF-Konfiguration mit allen fünf Kanälen in voller Auflösung (MPF 1) kommt leider nicht vor. Es liegen aber immerhin 84 Streifen mit MPF 1 in den Stereokanälen vor. Der Nadirkanal wird bis auf wenige Ausnahmen immer in der vollen Auflösung übertragen. Im Normalfall wird die Aufnahme Konfiguration mit MPF 1-2-2-2-2 (in ND-S1-S2-P1-P2) oder 1-2-2-4-4 verwendet, wobei beide jeweils etwa gleich oft vorkommen.

Als nächstes werden die Kombinationen festgelegt, in denen die Bilder zugeordnet werden sollen. Wie in 4.1 und 4.3 bereits erläutert, wird normalerweise das Referenzbild paarweise den anderen vier zugeordnet. Nur in besonderen Einzelfällen mit fehlerhafter Überdeckung oder Datenlücken ist es sinnvoll, in allen Kombinationen zuzuordnen. Da die relative Genauigkeit der einzelnen Bilder eines Streifens recht hoch ist und mit dem MOLA-Datensatz ein ausgezeichnetes DGM vorliegt, genügen einschließlich der Originalebene insgesamt drei Pyramidenstufen, um den richtigen Punkt zu finden. Auch hier gibt es Beispiele für Ausnahmen aus der Anfangszeit der Mission, bei denen quer zur Epipolarrichtung Abweichungen von bis zu 32 Pixeln zur Näherungsposition vom Autor beobachtet wurden. In solch einem Fall kann eine weitere Pyramidenstufe Abhilfe schaffen, und/oder der Suchraum wird entsprechend

erweitert. Des Weiteren hat sich im Laufe des Projekts für die Bündelausgleichung empirisch eine durchschnittliche Punktzahl von 25 000 pro Streifen als zweckmäßig erwiesen. Mit einem Punktabstand von 32 Pixeln wird dieser Wert in der Regel erreicht, es ergeben sich aber Schwankungen bedingt durch Bildauflösung, -größe und Textur. Als Schwellwert für einen angenommenen Punkt bei der Kreuzkorrelation wird ein recht niedriger Wert von 0,6 verwendet. Dadurch wird es ermöglicht, auch in texturarmen Bereichen des Streifens Punkte zu erzeugen. Als Suchbereich wird ein 7×5 Pixel großes Rechteck definiert, dessen längere Seite entlang der Epipolarrichtung verläuft. Auf der untersten Pyramidenstufe (Originalauflösung) kann der Suchbereich auf 5×5 verkleinert werden. Wegen der Vorentzerrung der Bilder kann eine große Mustermatrix von 35×35 Pixeln verwendet werden, die bei kritischen texturarmen Bildern auch noch größer sein kann. Die bidirektionale Überprüfung der Punkte hat sich bei den HRSC-Daten als nicht vorteilhaft erwiesen. Dieses Verfahren ist besonders bei der Vermeidung von Punkten mit Verdeckungen hilfreich, die bei den Marsdaten so gut wie nicht vorkommen. Die Fenstergröße für das LSM sollte nicht kleiner sein als bei der Kreuzkorrelation, damit nicht unnötig viele Tupel wegen Instabilität an dieser Stelle herausfallen. Als Schwellwert für den Abbruch der Iterationen wird eine Verschiebung von 0,01 Pixel festgelegt, der in etwa eine Größenordnung unter der hier erreichbaren Genauigkeit liegt. Als eine weitere Abbruchbedingung wird eine maximale Verschiebung von 3 Pixeln zugelassen, denn es wird angenommen, dass die Punkte aus der Kreuzkorrelation mindestens diese Genauigkeit aufweisen. Einen größeren Konvergenzradius besitzt das LSM erfahrungsgemäß auch nicht, so dass Punkte mit größeren Verschiebungen als Fehler gewertet werden.

5.2.2 Ergebnisse

In diesem Teil werden praktische Ergebnisse mit Einzelstreifen präsentiert, die verschiedene Aspekte verdeutlichen sollen. Dazu gehört eine kurze Gegenüberstellung des merkmals- und des gitterbasierten Ansatzes, eine Untersuchung zur Wahl des Maßstabs und ein Vergleich zwischen Kreuzkorrelation und LSM.

Wie in 4.3 bereits beschrieben, sollen die Kandidatenpunkte für die Zuordnung nicht merkmalsbasiert sondern in einem regelmäßigen Gitter festgelegt werden. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 40 und Abb. 41 ein Ausschnitt aus Bildstreifen h1235_0001 zu sehen, dem die erfolgreich zugeordneten Verknüpfungspunkte überlagert sind. Für einen ausgeglichenen Vergleich wurden in beiden Beispielen etwa gleich viele Punkte extrahiert bzw. bestimmt (Feature: 17996; Gitter: 17904). Wie in Abb. 40 zu sehen ist, folgen die mit dem Förstner-Operator extrahierten und zugeordneten Punkte topographisch auffälligen Strukturen wie Krater oder Bruchkanten. An diesen Stellen treten sie in dichten Ballungen auf, während andere Bereiche leer sind. In texturarmen Gebieten finden sich wie erwartet keine Punkte. In Abb. 41 ist das Ergebnis des gitterbasierten Ansatzes dargestellt. Hier fällt auf, dass die Punkte viel gleichmäßiger verteilt und nicht ausschließlich an topographisch markanten Stellen zu finden sind. Sehr texturarme Gebiete können mit dieser Methode allerdings auch nicht abgedeckt werden. Solange solche Gebiete nicht zu ausgedehnt im Bildstreifen vorhanden sind, so dass ganze Abschnitte leer sind, ist das für die Bündelausgleichung noch ausreichend.

Um die Qualität einer typischen Standardauswertung zu evaluieren, wurden 45 Bildstreifen ausgewählt. Die Bildqualität variiert von sehr gut bis zu Bildern, deren Kontrast und Schärfe durch Staub in der Atmosphäre getrübt ist. Alle Bilder wurden im Makropixelformat 1-2-2-2-2 (ND-S1-S2-P1-P2) aufgenommen; in fünf Fällen liegen die Stereokanäle sogar in der vollen Auflösung vor. Die Bildinhalte umfassen nahezu alle möglichen Geländeformen, d. h. es finden sich sehr abwechslungsreiche Kraterlandschaften oder Erosionsgebiete gegenüber Bildern, welche über weite Strecken sehr texturarm sind. Neben Grabensystemen mit abrupten großen Höhenänderungen finden sich Vulkanhänge mit über sehr weite Strecken stetiger Höhenänderung. Ein kleiner Einblick in die verschiedenen Bildtypen ist in Abb. 42 dargestellt. Die Mittelwerte der Ergebnisse der Bündelausgleichung zur Analyse der Vorwärtsschnitte aus zwei verschiedenen Testläufen sind in den Tabellen 11–14 zusammengefasst. Die Ergebnisse aller einzelnen Bildstreifen befinden sich in Anhang C (Tabellen 23–27). Die Punkte des ersten Testlaufs wurden ausschließlich mit der Kreuzkorrelation (KK) erzeugt. Beim zweiten Testlauf wurde zusätzlich LSM durchgeführt. Für die Evaluierung mit der Bündelausgleichung wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Relative Orientierung mit Grobfehlersuche in den Bildkoordinaten
- Absolute Orientierung mit Grobfehlersuche in den Differenzen zwischen MOLA-DGM und HRSC-Punkt看
- Berechnung der Strahlenschnitte aus Vorwärtsschnitt
- Ändern der Genauigkeiten der Bildkoordinaten und Start von vorne bis Standardabweichung der Gewichtseinheit etwa 1 ist

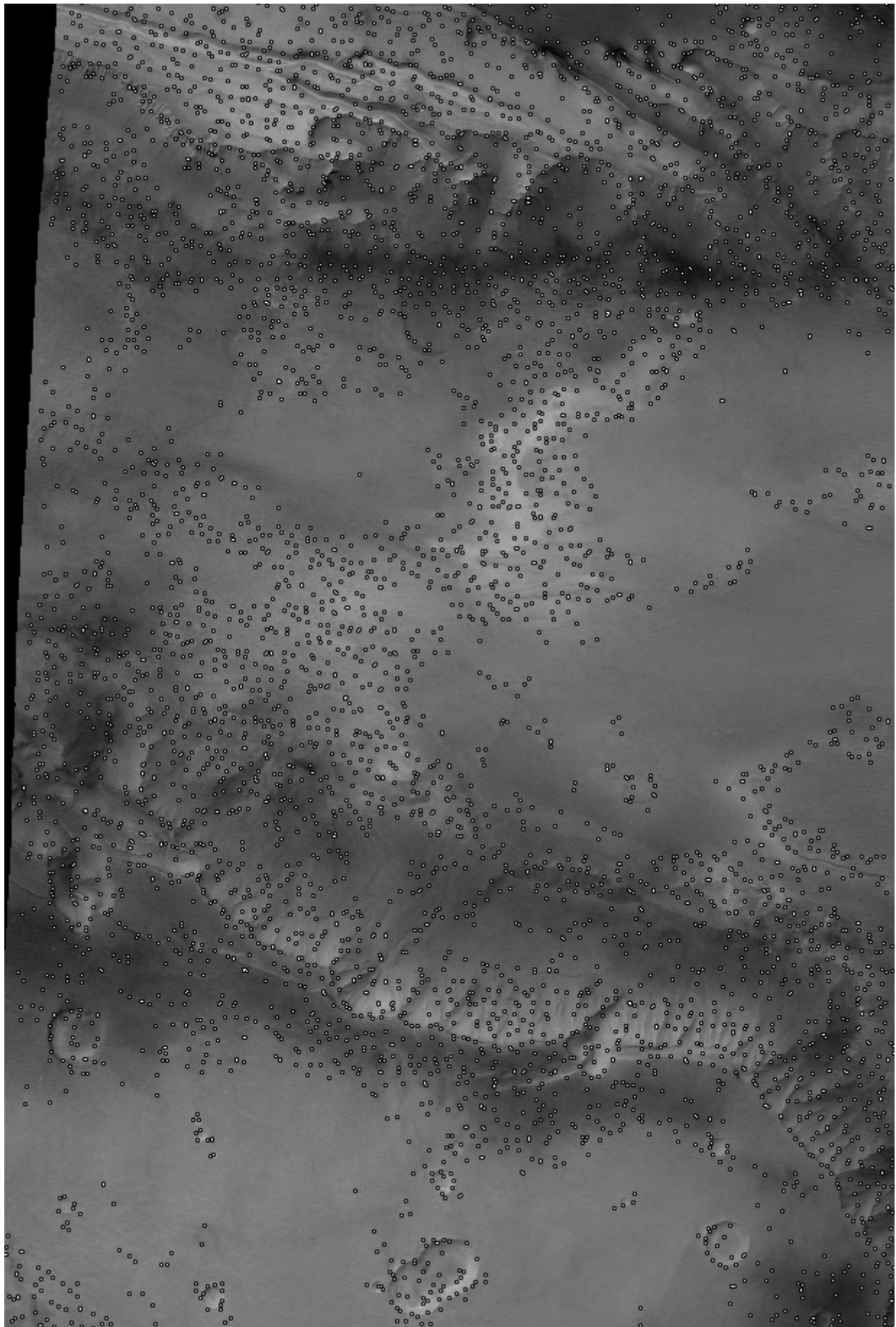


Abb. 40: Verteilung der Verknüpfungspunkte in einem Ausschnitt von h1235_0001, merkmalsbasiert

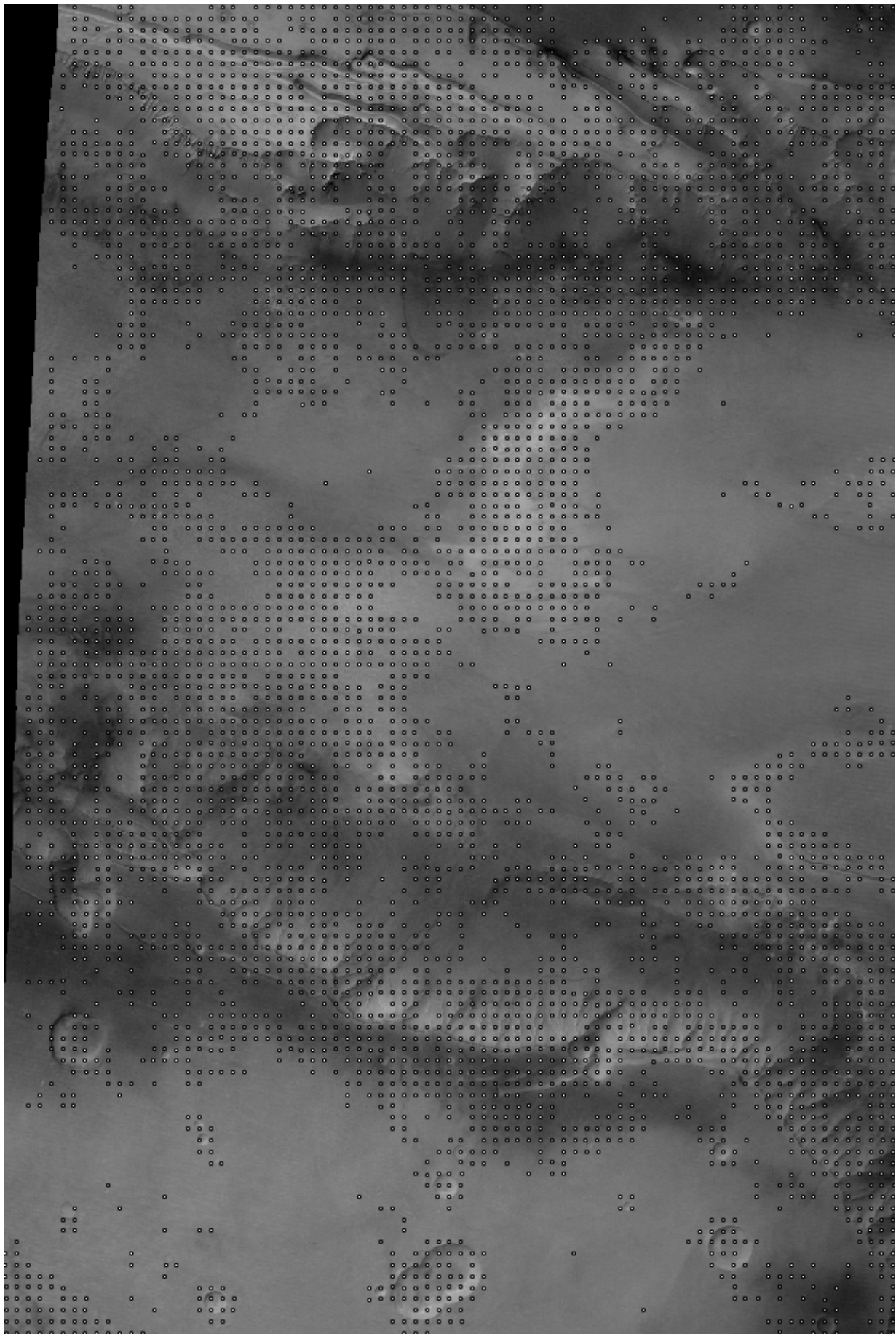


Abb. 41: Verteilung der Verknüpfungspunkte in einem Ausschnitt von h1235_0001, gitterbasiert

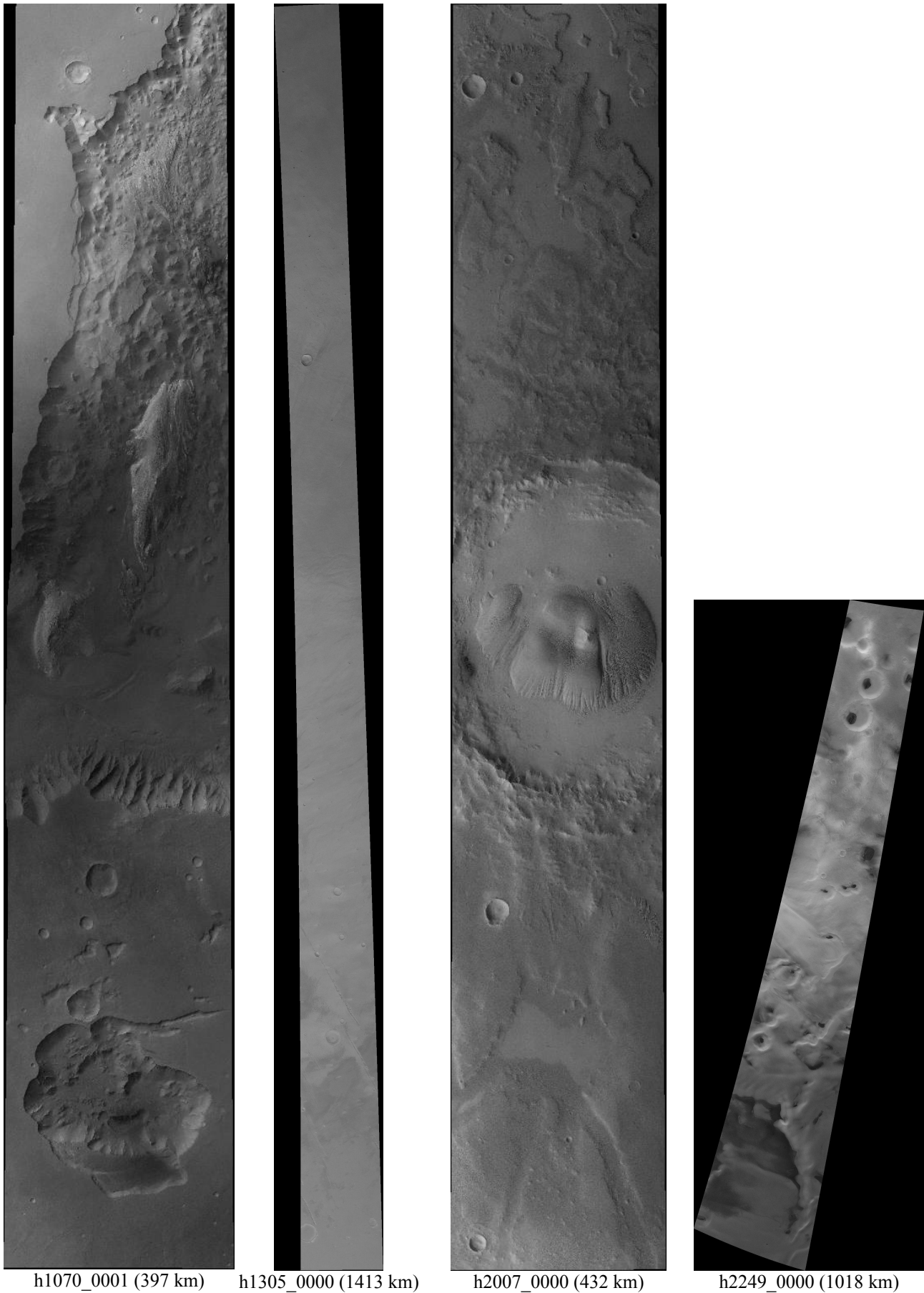


Abb. 42: Vier Beispiele für Bildstreifen aus dem Testdatensatz, Maßstäbe sind nicht gleich (Länge angegeben)

Die Bündelausgleichung, d.h. der erste und zweite Schritt, erfolgt nach dem in 4.4 bzw. in (Spiegel 2007) beschriebenen Verfahren. Im ersten Schritt werden bei der Berechnung der Relativen Orientierung Punkte eliminiert, die anhand der Restfehler ihrer Bildkoordinaten als fehlerhaft zugeordnet betrachtet werden. Hierbei kann aus geometrischen Gründen der Rollwinkel nur schlecht bestimmt werden. Dies hat zur Folge, dass die quer zur Flugrichtung verlaufende Komponente Y der HRSC-Objektpunkte hinsichtlich der Genauigkeit der Strahlenschnitte nicht analysiert werden kann, da sie mit dem Rollwinkel hoch korreliert ist. Es ist daher der zweite Schritt zur Bestimmung der Absoluten Orientierung notwendig. In diesem Schritt werden, neben der Anpassung der HRSC-Objektpunkte ans MOLA-DGM, zusätzlich HRSC-Objektpunkte eliminiert, wenn einzelne HRSC-Objektpunkte größere Restdifferenzen zum MOLA-DGM aufweisen. Nach der Absoluten Orientierung wird mit den verbleibenden Punkten im dritten Schritt ein separater Vorwärtsschnitt berechnet, um für die Evaluierung der digitalen Bildzuordnung den Einfluss des MOLA-DGMs auf die Ergebnisse auszuschließen. Die hierbei verwendete verbesserte Äußere Orientierung aus dem zweiten Schritt ist vom MOLA-DGM in den Komponenten, die bei der Relativen Orientierung nicht bestimmt werden konnten, beeinflusst. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die Ergebnisse der Strahlenschnitte, wodurch die Relative Orientierung erhalten bleibt und die Genauigkeiten der Strahlenschnitte in diesem Schritt betrachtet werden können. Die Genauigkeiten der Bildkoordinaten sind vom Bildmaterial abhängig und variieren daher. Damit die Standardabweichungen der Datensätze verschiedener Streifen direkt miteinander verglichen werden können, werden die a priori Standardabweichungen der Bildkoordinaten im vierten Schritt individuell angepasst und das Verfahren wird iteriert, bis sich für die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 immer $1,0 \pm 0,01$ ergibt. Für alle Bildstreifen wurden die selben Programmeinstellungen verwendet. Die Bilder wurden vorher nicht gefiltert, so dass diese Untersuchungen als unabhängig von den Arbeiten aus Abschnitt 5.1 betrachtet werden können.

In Tabelle 11 (s. a. Tabellen 23 und 24) sind die Theoretischen Standardabweichungen in den Komponenten X, Y und Z dargestellt. Die Werte beziehen sich auf ein lokales Koordinatensystem, in dem X (entlang der Flugrichtung) und Y (quer zur Flugrichtung) die Lage angeben und Z die Höhenkomponente darstellt. In der ersten Spalte ist die manuell festgelegte Auflösung (Pixelgröße) der Vorentzerrung angegeben. Der Durchschnittswert liegt hier bei etwa 30 Metern, wobei die Bildstreifen mit voller Auflösung in den Stereokanälen (MPF 1) in doppelt so hoher Auflösung prozessiert werden konnten. Daneben gibt es aber auch Bildstreifen, die etwas abseits des Perizentrums aufgenommen wurden und nur mit einer Auflösung von bis zu 60 Metern vorentzerrt werden konnten. Die beiden Zeilen zeigen die Ergebnisse, die ausschließlich mit der Kreuzkorrelation und mit zusätzlichen LSM erzielt wurden. Der erste Wert in einer Spalte gibt den Wert vor der Ausgleichung an, und der zweite gibt entsprechend das Ergebnis nach der Ausgleichung an.

	Auflösung [m]	X [m]		Y [m]		Z [m]	
		Vor BA	Nach BA	Vor BA	Nach BA	Vor BA	Nach BA
KK	32,9	15,6	7,3	12,2	5,5	55,0	25,6
LSM	32,9	14,5	4,5	11,3	3,4	50,9	15,8

Tabelle 11: Theoretische Standardabweichungen der Strahlenschnitte

In der Tabelle ist zu beobachten, dass schon vor der Ausgleichung in der Lage eine relative Genauigkeit von etwa einem halben Pixel erzielt werden kann. Die Y-Komponente ist im Mittel etwas genauer bestimmbar als die X-Komponente entlang der Flugrichtung. Daher wird beim LSM in Y-Richtung schon fast ein Wert von 0,3 Pixel erreicht. Die Höhenkomponente Z ist mit einem Wert von etwa 1,5 Pixel deutlich schlechter zu bestimmen, was mit dem geringen Konvergenzwinkel der Kamera zu erklären ist. Die LSM-Werte sind schon vor der Ausgleichung im Mittel in der Lage ca. 1 Meter und in der Höhenkomponente ca. 4 Meter besser als mit der Kreuzkorrelation alleine. Interessant sind nun die Ergebnisse nach der Ausgleichung: Während die Standardabweichung bei den KK-Ergebnissen etwa halbiert werden konnten, sind die Werte für die LSM-Ergebnisse auf etwa ein Drittel geschrumpft. Es werden in der Lage vereinzelt Spitzenwerte von beinahe 1 Meter und in Z von 5 Meter erzielt. Im Durchschnitt werden in X 4,5 m, in Y 3,4 m und in Z 15,8 m erreicht. Im Verhältnis zur jeweiligen Auflösung ergibt das in X 0,14 (1/7) Pixel, in Y 0,11 (1/9) Pixel und in Z 0,48 (1/2) Pixel. In Anbetracht des anspruchsvollen Bildmaterials und der Tatsache, dass keine Merkmalspunkte verwendet wurden, kann hier von einem hervorragenden Ergebnis gesprochen werden.

Als nächstes ist von Interesse, wie viele Punkte überhaupt generiert wurden und wie hoch der Anteil eliminiertes Punkte ist. In Tabelle 12 (bzw. 25) sind die Punktzahlen für die KK-Ergebnisse dargestellt. Der erste Wert gibt jeweils die von der Bildzuordnung gelieferte Punktzahl an, der zweite Wert bezieht sich auf die verbliebene Menge, die von der Ausgleichung schließlich verwendet wurde. Der Unterschied kommt dadurch zustande, dass in der Bündelausgleichung ausschließlich mindestens Dreistrahlpunkte verwendet werden, d.h. die Zweistrahlpunkte werden eliminiert. Ein anderer Teil der Punkte wird über mehrere Iterationen durch eine Grobfehlersuche eliminiert. Den Anteil dieser Blunder

gibt der dritte Wert in dieser Spalte wieder. Im Mittel wurden 31 633 Punkte für die Bündelausgleichung geliefert. Je nach Größe, Auflösung, Qualität und Textur des Bildstreifens ergeben sich hierbei Schwankungen von etwa 15 000 bis an die 60 000 Punkte. Der Anteil eliminerter Punkte liegt bei einem guten Wert von 8,2%, wobei auch hier natürliche Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Bildqualitäten und -inhalte von 3% bis 14% vorkommen. Beim LSM kann es vorkommen, dass einige Tupel nicht konvergieren und verworfen werden müssen. Daraus ergibt sich, dass die Gesamtzahl der generierten Bildpunkte bei gleicher Gitterweite im Vergleich zur KK geringer ausfällt. Im Durchschnitt sind es 27 700 Punkte, wovon 11,8% als grobe Fehler eliminiert werden. Somit verbleiben 22 400 Punkte, was aber durch eine vorhergehende Bildfilterung (s. 5.1.3.2) noch erhöht werden kann.

KK			LSM		
Nach Zuordnung	Nach BA	Anteil elim. Punkte [%]	Nach Zuordnung	Nach BA	Anteil elim. Punkte [%]
31633	26739	8,2	27698	22412	11,8

Tabelle 12: Punktzahlen für KK und LSM

Die a priori Genauigkeit der Bildkoordinaten wurde wie schon erwähnt für diese Untersuchung adaptiert, um möglichst einen Wert von 1,0 für die Standardabweichung der Gewichtseinheit zu erzielen. Im Mittel hat sich ein Wert von 0,32 Pixel bei der KK ergeben, und beim LSM-Datensatz ergab sich ein Mittelwert von 0,19 Pixel (s. Tabelle 13 bzw. 26). Weiterhin sind die Faktoren informativ, um welches Verhältnis sich die Punkte nach der Bündelausgleichung verbessert haben bzw. wie das Verhältnis zwischen KK und LSM aussieht. Dazu wurde ein Faktor berechnet, um wie viel sich die einzelnen Koordinatenkomponenten verbessert haben. Dabei war zu beobachten, dass sich in allen drei Komponenten eines Streifens fast ausnahmslos immer der gleiche Faktor ergab. Die Abweichungen betragen in Einzelfällen höchstens $\pm 0,1$, so dass in der Tabelle nur ein gemeinsamer (gemittelter) Faktor angegeben wird:

Genauigkeit der BiKo [Pixel]		Faktor zw. vor/nach Ausgl.		Faktor zw. KK/LSM	
KK	LSM	KK	LSM	Vor BA	Nach BA
0,32	0,19	2,3	4,0	1,1	1,8

Tabelle 13: Genauigkeiten der Bildkoordinaten, vergleichende Faktoren

Bei der KK konnten die Punkte im Mittel durch die Bündelausgleichung um den Faktor 2,3 verbessert werden. Hierbei ist zu bemerken, dass einige Bildstreifen mit einem Faktor von 1,1 so gut wie gar nicht verbessert werden konnten, während ein anderer Streifen um den Faktor 5,2 verbessert werden konnte. Beim LSM hat sich im Mittel sogar ein Faktor von 4 ergeben. In den letzten beiden Spalten ist noch der Faktor zwischen KK und LSM angegeben. Vor der Ausgleichung ist zu beobachten, dass die Punkte aus dem LSM gegenüber denen aus der KK nur unwesentlich genauer sind (Faktor 1,1). Nach der Ausgleichung ergibt sich im Durchschnitt ein Faktor von 1,8, d. h. die Objektpunkte aus dem LSM sind fast doppelt so genau wie die ohne LSM. Dieser Faktor wird ungefähr auch zwischen der a priori Genauigkeit der Bildkoordinaten von KK und LSM erreicht, der bei 1,6 liegt.

Zuletzt soll noch betrachtet werden, aus wie vielen Strahlen die Tupel in den einzelnen Bildstreifen bestehen. Für eine möglichst stabile Bündelausgleichung sollten idealerweise nur Fünfstrahlpunkte generiert werden. In Tabelle 14 bzw. 27 sind die prozentualen Anteile an Zwei-, Drei-, Vier- und Fünfstrahlpunkten angegeben. Die Fünfstrahlpunkte besitzen hier einen sehr hohen Anteil von fast 75%. Die restlichen Werte liegen meistens unter 10%. Der Anteil der Zweistrahlpunkte sollte möglichst niedrig sein, denn diese werden wie schon erwähnt in der Ausgleichung nicht verwendet. Außerdem ist noch zu beobachten, dass in der Verteilung der Anteile so gut wie kein Unterschied zwischen KK und LSM existiert. Bei problematischen Bildstreifen wie z. B. dem texturarmen h1305_0000 ist zu erkennen, dass der Anteil an Fünfstrahlpunkten abnehmen kann. In diesem konkreten Fall ist der Anteil auf ca. 43% gesunken und hat sich zu den Vier- und vor allem zu den Dreistrahlpunkten verlagert. Der Anteil der Zweistrahlpunkte ist mit 14% immer noch sehr niedrig. Auf der anderen Seite können mit Bildern guter Qualität und ausreichend Textur Werte von beinahe 90% Fünfstrahlpunkten erzielt werden.

Anteil Mehrstrahlpunkte KK [%]				Anteil Mehrstrahlpunkte LSM [%]			
2	3	4	5	2	3	4	5
8,0	9,6	8,7	73,7	8,5	9,6	8,4	73,5

Tabelle 14: Anteile der Mehrstrahlpunkte

Als Fazit dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass mit den aus LSM erzeugten Punkten eine sehr hohe Genauigkeit von ungefähr 1/8 Pixel in der Lage und 1/2 Pixel in der Höhe im Verhältnis zur Auflösung der Vorentzerrung erreicht worden ist. Die Punktgenauigkeit beim Vorwärtsschnitt kann vereinzelt Spitzenwerte von fast 1 Meter in der Lage und 5 Meter in der Höhenkomponente erreichen. Es wurden ausreichend viele Punkte generiert, wobei die Gesamtzahl durch eine Bildfilterung noch gesteigert werden kann. Dreiviertel aller Tupel bestehen aus allen fünf möglichen Punkten, so dass für die Bündelausgleichung eine stabile Datengrundlage zur Verfügung steht.

Als nächstes soll untersucht werden, welcher Bildmaßstab bei der Vorentzerrung geeignet ist. Genauer gesagt wird untersucht, ob es sich lohnt, alle Bilder auf die volle Auflösung des Nadirkanals hochzurechnen. Der LSM-Datensatz aus der vorherigen Untersuchung wird mit einem Datensatz verglichen, bei dem in einer doppelt so hohen Auflösung gerechnet wurde. Die Gitterweite wurde angepasst, so dass sich ungefähr die gleichen Punktzahlen ergeben, wobei dennoch stellenweise Restunterschiede von bis zu 2500 Punkten übrig bleiben. Die fünf Streifen, welche in den Stereokanälen die volle Auflösung besitzen, gehen nicht mit in diese Untersuchung ein, denn bei diesen wurde bereits die höchstmögliche Auflösung verwendet. In Tabelle 15 (bzw. 28) sind diese beiden Varianten gegenübergestellt: Aufgeteilt in die drei Koordinatenkomponenten X, Y und Z werden die Theoretischen Standardabweichungen vor und nach der Ausgleichung betrachtet. In der jeweils dritten Spalte von X, Y und Z sind die Differenzen zwischen den beiden Datensätzen (Doppelt - Standard) berechnet worden. Am Mittelwert kann man erkennen, dass sich kein Vorteil ergibt, wenn die vier Stereo- bzw. Photometrikanäle auf die Nadirauflösung hochgerechnet werden. Hierbei ist noch anzumerken, dass die verwendeten Bildstreifen alle mit einer MPF-Konfiguration von 1-2-2-2-2 (ND-S1-S2-P1-P2) aufgenommen wurden. In der Hälfte aller Fälle bei der Standardprozessierung kommen Streifen der Konfiguration 1-2-2-4-4 vor, bei denen die Photometrikanäle schon um den Faktor 4 hochgerechnet werden müssten. Diese bieten also ein noch geringeres Genauigkeitspotenzial als die Konfiguration 1-2-2-2-2. Interessanterweise fällt der h2216_0000 als Ausreißer auf (s. Tabelle 28), bei dem sich in der Z-Komponente eine Differenz von ca. 10 m nach der Ausgleichung zugunsten der doppelten Auflösung ergibt. Die geringste Auflösung wird am Anfang dieses Streifen im S2-Kanal mit 68 m erreicht. Wird anstatt einer eher konservativen Auflösung von 45 m für die vorentzerrten Bilder ein Wert von 35 m verwendet, der der maximal erreichten Auflösung entspricht, so sinkt die Differenz auf 5,5 m. Es verbleibt also ein kleiner Vorteil für die Lösung in doppelter Auflösung bei diesem Streifen. Es konnte keine Erklärung dafür gefunden werden, vermutlich ist der Grund die hochelliptische Flugbahn. Allerdings sollte auch erwähnt werden, dass in der doppelten Auflösung nur ein Anteil von 48% Fünfstrahlpunkten gegenüber 60% im Standardfall vorliegen. Gemittelt über alle 45 Bildstreifen ergibt sich ein Anteil von 68,0% Fünfstrahlpunkten gegenüber den 73,5% im Standardfall (s. Tabelle 14). Insgesamt ergibt sich also ein Vorteil für die Konfiguration, bei der der Nadirkanal heruntergerechnet wird.

X (vor/nach BA) [m]			Y (vor/nach BA) [m]				Z (vor/nach BA) [m]										
Standard	Doppelt	Differenz	Standard	Doppelt	Differenz	Standard	Doppelt	Differenz	Standard	Doppelt	Differenz						
14,7	4,7	14,5	4,7	-0,1	0,0	11,2	3,5	11,2	3,5	0,0	0,0	51,1	16,3	51,2	16,5	0,1	0,3

Tabelle 15: Differenzen zwischen der Rechnung in der Standardauflösung und in der doppelten Auflösung

5.2.3 Statistik der Standardprozessierung

Zum Schluss wird noch eine Statistik über die operationelle Standardprozessierung gegeben. Es werden die Daten der ersten 5000 Marsumrundungen, d.h. bis einschließlich Streifen h4995_0001, berücksichtigt. In diesem Zeitraum wurden rund 1900 Bildstreifen von der Marsoberfläche aufgenommen. Die Daten der letzten drei Monate des betrachteten Zeitraums konnten allesamt nicht verwertet werden, da aufgrund eines großen Staubsturmes eine ungenügende Bildqualität erhalten wurde, wodurch über 200 Bildstreifen nicht verwendet werden konnten. Insgesamt wurden 1396 Streifen prozessiert, wovon 1138 erfolgreich mit der Bündelausgleichung verbessert werden konnten. Die Differenz zu den insgesamt 1900 aufgenommenen Bildstreifen ergibt sich daraus, dass nicht alle Bilder photogrammetrisch auswertbar sind. Neben den schon erwähnten Staubstürmen konnten diverse Bildstreifen aufgrund

von geringer Textur, Lücken in den Bilddaten, Limb-Aufnahmen, Überbelichtungen oder zu kurzen Bildern nicht ausgewertet werden. Unter den 258 gescheiterten Streifen sind viele, die eine zu geringe Textur im Zielgebiet oder eine zu staubige Atmosphäre aufweisen. Ein entsprechender Anteil konnte trotz ausreichend hoher Punktzahlen von der Bündelausgleichung nicht erfolgreich ausgeglichen werden. Dies sind teilweise Gebiete mit sehr flacher Gelände- undulation, die eine absolute Anpassung an das MOLA-DGM mit dem verwendeten Ansatz zwar in der Höhe aber nicht in der Lage ermöglichen. Bei einigen Bildstreifen konnte letztendlich die Ursache nicht geklärt werden. Insgesamt betrachtet kann festgehalten werden, dass die operationelle Verarbeitung gelungen ist und in Anbetracht des anspruchsvollen Bildmaterials ausgezeichnete Genauigkeiten erzielt wurden.

5.3 Prozessierung von Blöcken

Neben der operationellen Prozessierung von Einzelstreifen werden immer mehr Blockverbände von Streifen interessant, da sie größere Gebiete von geologisch interessanten Formationen abdecken und somit eine synoptische Untersuchung ermöglichen. In diesem Abschnitt wird das Konzept zur Prozessierung von Blockverbänden vorgestellt und anhand von zwei Beispielen demonstriert. Es handelt sich dabei um einen Block bestehend aus sieben Einzelbildstreifen mit untereinander recht homogenen Bildmaterial im Gebiet „Iani Chaos“ und um einen großen Blockverband bestehend aus 16 Bildstreifen, die den „Olympus Mons“ abdecken. Die Bilder dieses Blockes sind sehr unterschiedlich bezüglich Auflösung, Beleuchtung und Bildqualität und stellen daher eine besondere Herausforderung für die Bildzuordnung dar.

5.3.1 Konzept

Um auch große Blockverbände effizient verarbeiten zu können, muss ein geeignetes Konzept zur Prozessierung gefunden werden. Es ist nicht sinnvoll, alle Bilder des gesamten Blocks zusammen nach der in 4.2 und 4.3 beschriebenen Methode zu prozessieren. In der Regel überlappen sich nur benachbarte Streifen, so dass nach der klassischen Methode für Einzelstreifen viele Bilder enthalten wären, die sich nicht überlappen. Um diese Ineffizienz zu beheben, wird der Block in kleinere Teilblöcke unterteilt, was zudem den Vorteil einer parallelen Prozessierung mit sich bringt. Dazu wird das Master-Slave Konzept aus Abschnitt 4.1 bzw. 5.2.1 auf Teilblöcke erweitert. Anstatt der Referenzbilder treten nun Referenzstreifen, wobei für den gesamten Block jeder Streifen einmal Referenz sein muss. Dieser Referenzstreifen wird nun jedem anderen Bildstreifen zugeordnet, der ihn überlappt. Bei beispielsweise zwei Bildstreifen mit insgesamt zehn Einzelbildern würde der Nadirkanal des ersten Streifens allen restlichen neun Bildern nach der Methode für Einzelstreifen zugeordnet werden. Der zweite Teilblock besteht ausschließlich aus dem zweiten Streifen. Hier wird nur noch das übrige Gebiet abgedeckt, welches vom ersten Teilblock noch nicht erfasst wurde. Dieses Konzept wird anhand eines Beispiels bestehend aus drei Einzelstreifen in Abb. 43 verdeutlicht:

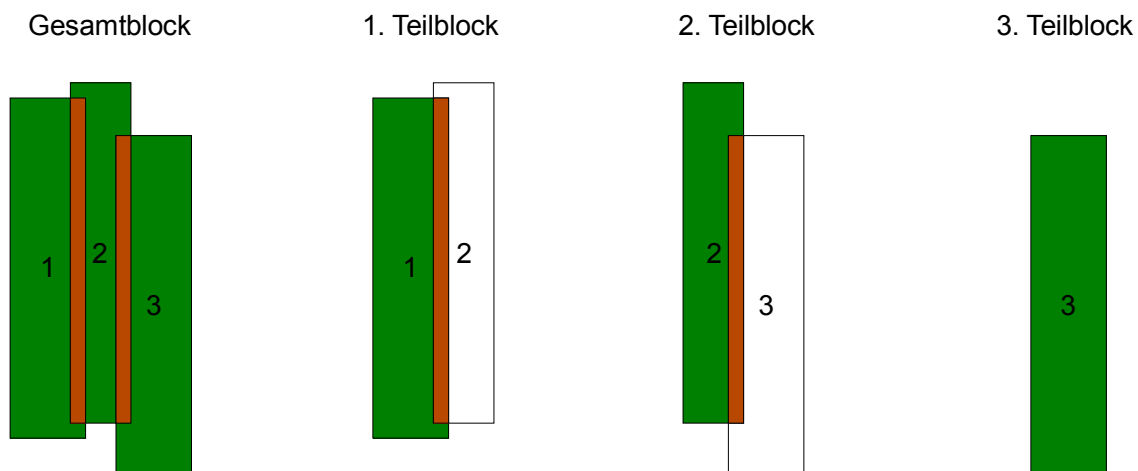


Abb. 43: Konzept der Teilblöcke am Beispiel mit drei Einzelstreifen, ■: max. 5-Strahl ■: max. 10-Strahl

Bei drei nebeneinanderliegenden Streifen ergeben sich drei Teilblöcke in den Kombinationen Streifen 1 & 2, 2 & 3 und 3 separat. Es werden also systematisch genauso viele Teilblöcke konstruiert wie es Einzelstreifen gibt, wobei der letzte immer gesondert prozessiert werden muss. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise insbesondere bei sehr inhomogenen Bildstreifen ist, dass sich pro Teilblock ein geeigneter mittlerer Maßstab festlegen lässt. Bei einer gemeinsamen Verarbeitung aller Bildstreifen müsste ein adäquater Maßstab für den kompletten Block gefunden werden. In der anschließenden Bündelausgleichung werden die Ergebnisse der Teilblöcke dann zusammen eingelesen und gemeinsam ausgeglichen (s. a. Spiegel 2007). Als Näherungswerte für die Vorentzerrung der Bilder werden neben dem MOLA-DGM die verbesserte Äußere Orientierung aus der Einzelstreifenprozessierung verwendet. Die Bilder eines Streifens weisen zwar eine recht hohe relative Genauigkeit auf, zwischen Bildern verschiedener Orbits können die Abweichungen allerdings mehrere Kilometer betragen, was sehr große Suchräume erfordern würde. Mit den verbesserten Einzelstreifen passen die Orbits untereinander schon sehr viel besser zusammen, so dass normal große Suchräume (s. 5.2.1) verwendet werden können.

5.3.2 Ergebnisse Iani Chaos-Block

Der „Iani Chaos-Block“ (s. Abb. 44) besteht aus den sieben Einzelstreifen h0890_0000, h0901_0000, h0912_0000, h0923_0000, h0934_0000, h0945_0000 und h0967_0000. An den Orbitnummern lässt sich schon erkennen, dass diese Streifen direkt nacheinander aufgenommen wurden, als das gleiche Gebiet drei Tage später wieder überflogen wurde (3:11 Resonanz). Daher weisen alle sieben Streifen untereinander eine annähernd gleiche Auflösung mit konstanter Überlappung unter einheitlichen radiometrischen Verhältnissen auf. Einige Kenndaten des jeweiligen Nadirkanals der sieben Streifen sind in Tabelle 16 zusammengefasst:

Streifen	Zeilen	Länge [km]	Breite [km]	Auflösung [m]	Flughöhe [km]	Aufnahmedatum
h0890_0000	64504	1182	95	22,7–14,0	566,4–349,3	28.09.2004
h0901_0000	75304	1296	89	21,4–13,0	535,6–323,3	02.10.2004
h0912_0000	78224	1277	85	20,2–12,5	503,4–310,4	05.10.2004
h0923_0000	81488	1275	81	19,2–12,1	477,7–300,3	08.10.2004
h0934_0000	65736	919	72	16,1–11,9	399,9–293,8	11.10.2004
h0945_0000	63912	890	72	16,0–11,9	396,5–292,6	14.10.2004
h0967_0000	67856	872	67	14,4–11,3	360,4–281,8	20.10.2004

Tabelle 16: Kenndaten des jeweiligen Nadirkanals der sieben verwendeten Bildstreifen

Das Gebiet Iani Chaos befindet sich ungefähr am Äquator bei 342° östlicher Länge und ist im südlichen Teil des Blocks zu sehen. Es stellt die Quellregion des ca. 1500 km langen Ausflusstals Ares Vallis dar, dessen Beginn im nordwestlichen Bereich zu sehen ist und schließlich in einem Delta in der Tiefebene Chryse Planitia endet. Ares Vallis wird zusätzlich von Westen von einem weiteren chaotischen Terrain gespeist: Der östliche Rand des Aram Chaos ist am westlichen Rand des Blockes zu sehen. Geologisch ist dieses Gebiet von hohem Interesse, da angenommen wird, dass dieses System aus chaotischen Quellgebieten und Ausflusstälern durch Wasser geformt wurde. Das von den sieben Streifen überdeckte Gebiet besitzt eine Ausdehnung von 1137 km in Nord-Süd-Richtung und 460 km in West-Ost-Richtung. Zur Verdeutlichung der Dimensionen wurden in der Abbildung 44 die Umrisse Deutschlands im gleichen Maßstab den Streifen überlagert. Die Streifen sind aufsteigend von Osten nach Westen angeordnet, d. h. h0890_0000 befindet sich am Ostrand des Gebietes, während h0967_0000 am Westrand liegt. Alle Streifen wurden im Pointing Mode „Across Track“ aufgenommen, d. h. die Sonde blickte bei der Aufnahme ein wenig zur Seite. Nur h0967_0000 wurde im Nadir-Modus geflogen, während in Orbit Nr. 956 keine Daten aufgenommen wurden. In den beiden Streifen h0901_0000 und h0945_0000 sind im südlichen Bereich Wolken vorhanden, die im Mosaik als weißer Schleier zu erkennen sind. Zur Prozessierung wurden gemäß der in 5.3.1 aufgestellten Regel sieben Teilblöcke erstellt und separat gerechnet: 890-901, 901-912, 912-923, 923-934, 934-945, 945-967 und 967 separat. Wegen der geometrischen Ähnlichkeit der Streifen untereinander wurde jeder Teilblock mit der einheitlichen Auflösung von 40 m vorentzerrt. In allen Bildstreifen wurden die Nadir-, Stereo- und Photometriekanäle verwendet, die alle in der MPF-Konfiguration 1-2-2-4-4 vorliegen. An den Flughöhen ist zu erkennen, dass innerhalb der Bildstreifen unterschiedliche Auflösungen vorhanden sind. Zu Beginn eines Streifen liegt die Flughöhe bei ca. 360–560 km, die dann zum Ende des Streifens auf etwa 300 km absinkt.

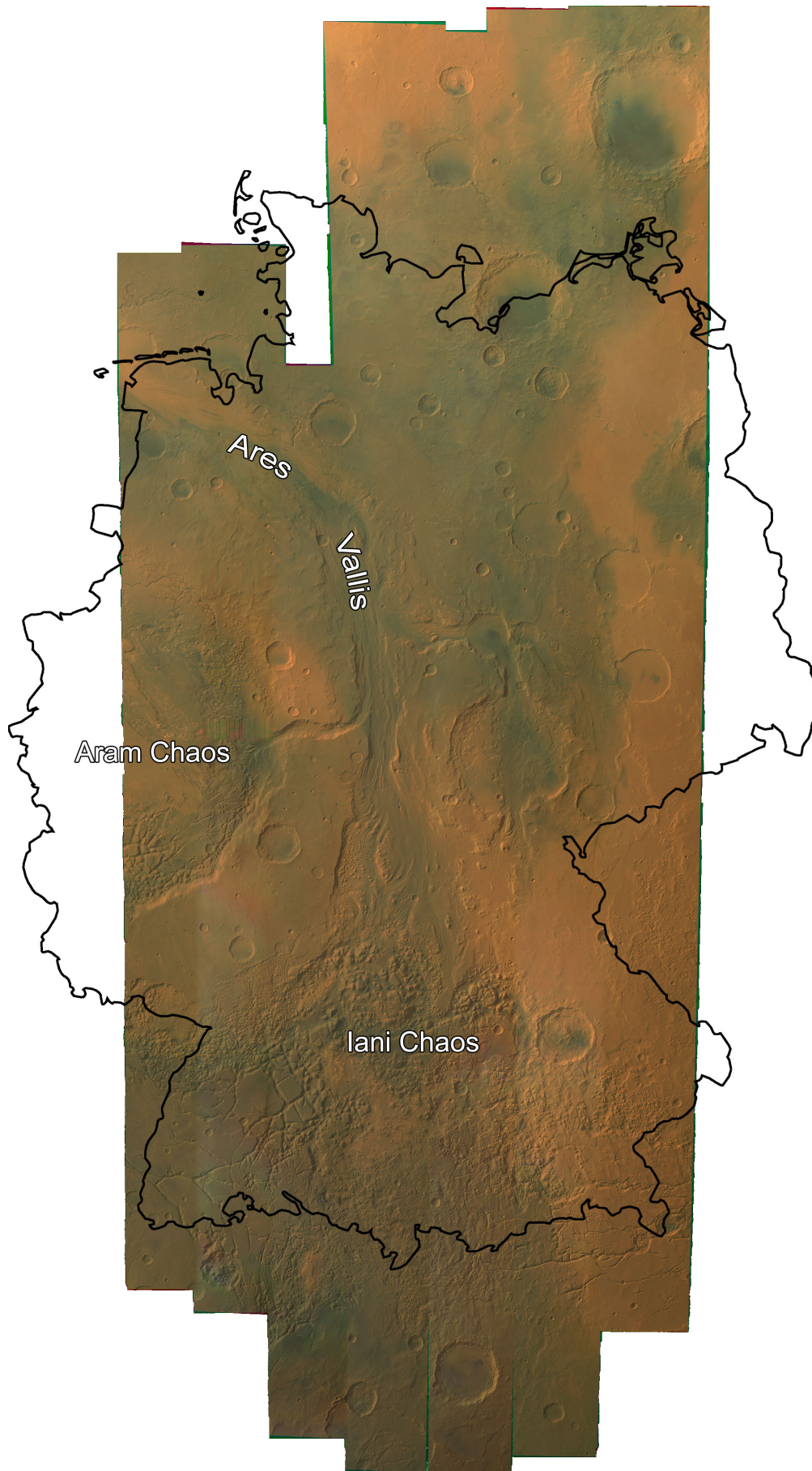


Abb. 44: Mosaik „Iani Chaos“ aus den jeweiligen drei Farbkanälen überlagert mit dem Umriss Deutschlands

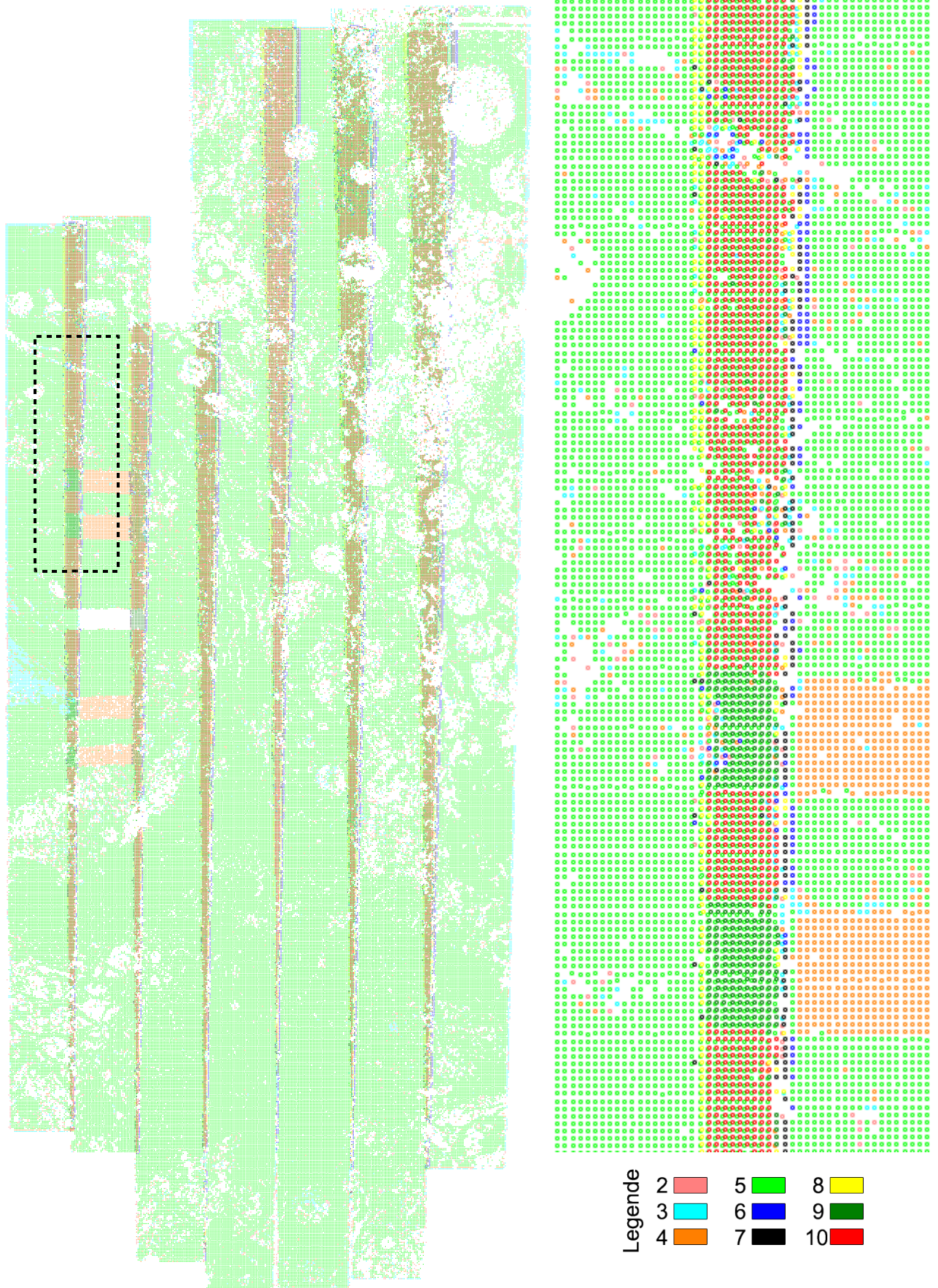


Abb. 45: Plot der Verteilung und Anzahl der Strahlen für den Block „Jani Chaos“, links gesamtes Gebiet, rechts vergrößerter Ausschnitt (markiertes Rechteck)

Bei der Analyse der Ergebnisse sind sowohl die Punktgenauigkeiten als auch die Punktverteilung von Interesse. In Abb. 45 ist die Verteilung der zugeordneten Punkte dargestellt, wobei die Anzahl der Strahlen, die zu einem Punkt gehören, mit Hilfe der Farben unterschieden werden kann. Innerhalb eines Streifens sind bis zu fünf Strahlen möglich, während im Überlappungsbereich idealerweise Zehnstrahlpunkte gefunden werden. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein vergrößerter Ausschnitt zu sehen, der in der linken Graphik durch ein schwarzes Rechteck gekennzeichnet ist. Im linken Übersichts-Plot kann man erkennen, dass die Verknüpfungspunkte sehr flächendeckend verteilt sind. Innerhalb eines Einzelstreifens wird praktisch immer die maximal mögliche Anzahl von fünf Strahlen pro Punkt erreicht. Im Überlappungsbereich wird ebenfalls fast immer die maximal mögliche Zahl von zehn Strahlen pro Punkt erreicht. Lediglich an den Rändern des Überlappungsbereiches werden manchmal nur Sechs- bis Neunstrahltpel gebildet, da sich an diesen Stellen nicht immer alle fünf Bilder eines Streifens überlappen. Im rechten vergrößerten Ausschnitt fallen zwei Bereiche auf, in denen nur Vierstrahlpunkte generiert wurden. Es handelt sich an dieser Stelle um einen Datenausfall in einem Bild. Etwas unterhalb des gezeigten Ausschnitts ist im linken Übersichts-Plot sogar ein Bereich zu sehen, in dem kein Punkt gefunden wurde, da hier ein Datenausfall in allen fünf Kanälen vorliegt.

Zum Schluss sind noch die Theoretischen Standardabweichungen der Strahlenschnitte nach der Ausgleichung interessant. Sie sind in Tabelle 17 zu sehen, wobei auf die Ergebnisse vor der Ausgleichung verzichtet wird, denn die Absoluten Orientierungen der einzelnen Bildstreifen passen vorher nicht genau genug zueinander, um hohe Genauigkeiten zu erreichen. Die Strahlenschnitte erreichen insgesamt hervorragende Werte, so dass als Fazit festgestellt werden kann, dass die Prozessierung dieses Blocks einen vollen Erfolg darstellt. Das Ziel, möglichst gleichmäßig verteilte hochgenaue Punkte vor allem im Überlappungsbereich zu finden, ist erreicht worden. Vereinzelt Punktlücken wirken sich nicht nachteilig auf die Bündelausgleichung aus.

Anzahl Strahlen	Punktzahl	Theor. Stdabw. der Strahlenschnitte		
		X [m]	Y [m]	Z [m]
3	25577	5,1	3,3	17,2
4	34163	3,5	2,7	11,8
5	130984	3,0	2,4	10,0
6	1645	3,4	2,4	10,7
7	2927	3,1	2,2	9,9
8	5609	2,8	2,1	9,1
9	5130	2,6	1,9	8,4
10	10368	2,4	1,8	7,7
	Σ 216403	\varnothing 3,2	\varnothing 2,4	\varnothing 10,6

Tabelle 17: Punktzahlen und Theoretische Standardabweichungen der Verknüpfungspunkte

5.3.3 Ergebnisse Olympus Mons-Block

Als zweites Testgebiet zur Evaluierung der Verknüpfungspunktsuche für Blockverbände wurde das Gebiet Olympus Mons ausgewählt. Der Olympus Mons ist mit einem Höhenunterschied zum umliegenden Gelände von teilweise über 25 km der höchste bekannte Vulkan bzw. Berg unseres Sonnensystems. Die mit einem Alter von ca. 2 Millionen Jahren für geologische Verhältnisse sehr junge nachgewiesene vulkanische Aktivität (Neukum et al. 2004) macht den Olympus Mons neben seinen imposanten Ausmaßen zu einem interessanten Forschungsobjekt.

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass mit untereinander homogenen Bildstreifen bezüglich Auflösung, Beleuchtung und Bildqualität sehr gute Ergebnisse bei der Blockprozessierung erzielt werden können. Nun soll untersucht werden, wie sich die Verknüpfungspunktsuche zwischen Bildstreifen verhält, die zu unterschiedlichen Zeitabschnitten der Mission und damit unter völlig verschiedenen radiometrischen und geometrischen Verhältnissen aufgenommen wurden. Hinzu kommt, dass die Flanken des Vulkans relativ gleichmäßig mit Lava bedeckt sind, so dass weite Flächen verhältnismäßig texturlos in den Bildern erscheinen. In Abb. 46 ist das zu bearbeitende Gebiet mit einer Ausdehnung von ca. 1400×750 km mit dem Olympus Mons im Zentrum als Mosaik der 16 Nadirkanäle abgebildet. Zur Identifizierung der einzelnen Bildstreifen wurde auf eine radiometrische Anpassung untereinander verzichtet. Die einzelnen Bezeichnungen für die jeweiligen Bildstreifen wurden dem Bild überlagert. An den abgeschnittenen Bildstreifen am Nord- und Südrand kann erahnt werden, dass diese sich noch weiter erstrecken. In der Tat sind einige sehr lange Bildstreifen dabei, die sich teilweise noch mehrere tausend Kilometer weiter nach Norden bzw. Süden erstrecken.

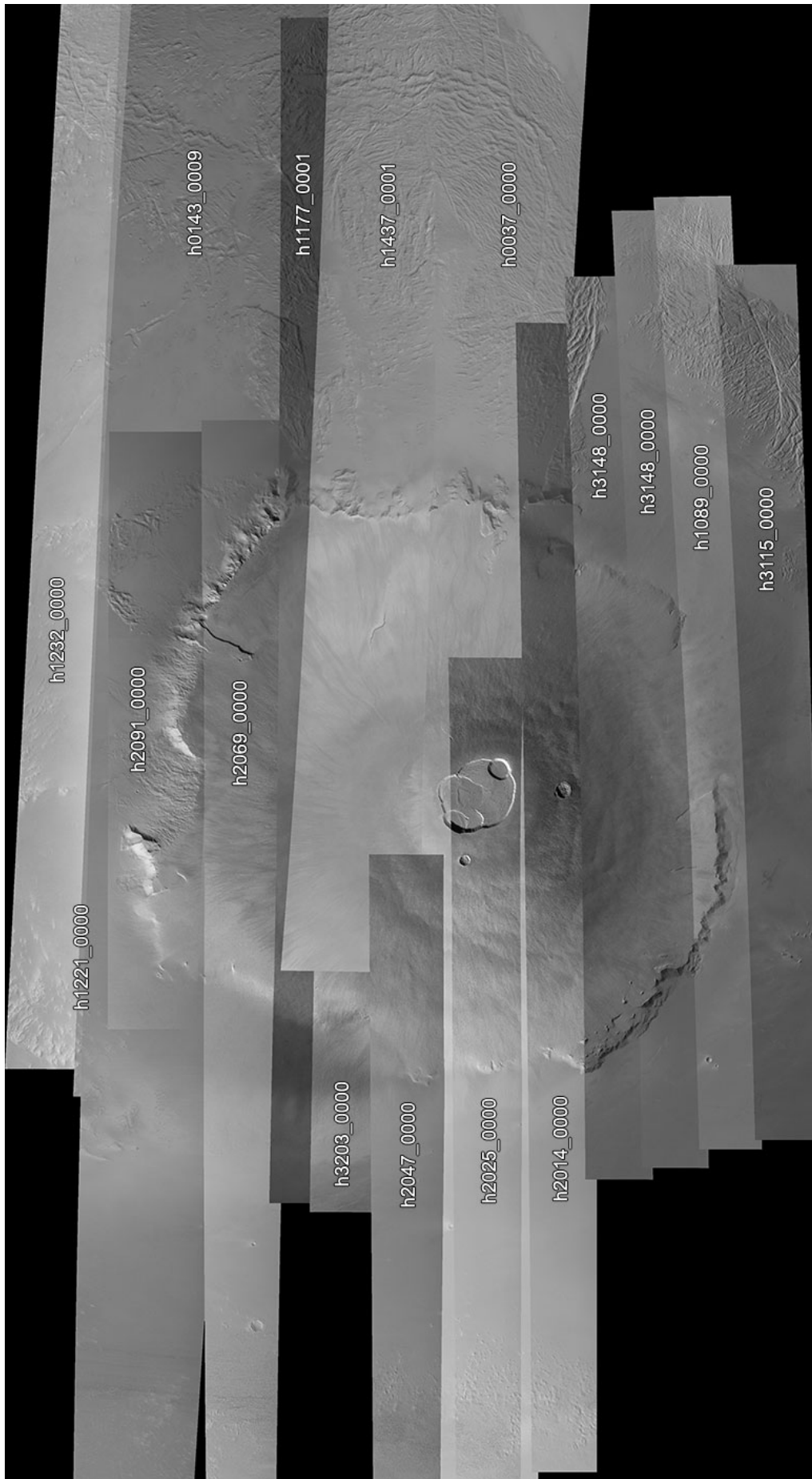


Abb. 46: Mosaik Olympus Mons aus den 16 Einzelstreifen der Nadirkanäle

In Tabelle 18 sind einige Kenndaten der Einzelstreifen aufgeführt, welche sich auf den jeweiligen Nadirkanal beziehen. An den Zahlen kann man erkennen, dass es sich hierbei um zueinander sehr verschiedene Bildstreifen handelt. Neben den üblichen Streifenlängen von ca. 1000 km sind auch einige dabei, die bedeutend länger sind. Ein markanter Spezialfall mit einer Länge von über 10 000 km ist Streifen h0143_0009. Am Anfang des Streifen beträgt die Auflösung 16,3 m, wegen des elliptischen Orbits und seiner großen Länge beträgt die Auflösung am Ende nur noch 70 m. Diese Auflösungen entsprechen einer Flughöhe von 271 km am Anfang bis 1551 km am Ende des Bildstreifens. Eine ähnliche Charakteristik weisen sonst nur noch h0037_0000 und h1437_0001 auf. Die anderen Bildstreifen haben eine Auflösung zwischen 12 und 20 Metern, wobei sich diese Angaben immer auf den Nadirkanal beziehen. Die anderen Kanäle haben durch das MPF höchstens die halbe Auflösung. Für alle 16 Bildstreifen liegen verbesserte Äußere Orientierungen aus der Standardprozessierung vor (vgl. 5.2.3).

Streifen	Zeilen	Länge [km]	Breite [km]	Auflösung [m]	Flughöhe [km]	Aufnahmedatum
h1232_0000	145000	2081	74	12,7–16,0	311,3–395,7	02.01.2005
h1221_0000	142784	2019	73	12,8–15,5	314,7–381,7	30.12.2004
h2091_0000	34832	647	96	16,2–20,9	403,7–522,8	31.08.2005
h0143_0009	245296	10573	223	16,3–69,9	271,0–1551,0	24.02.2004
h2069_0000	107992	1672	80	11,9–19,1	295,3–475,5	25.08.2005
h1177_0001	100344	1278	66	12,1–13,4	302,5–334,3	18.12.2004
h3203_0000	45792	616	70	12,8–14,1	318,6–350,4	08.07.2006
h1437_0001	75016	2342	162	21,0–41,4	524,8–1036,1	01.03.2005
h0037_0000	311256	8218	137	15,4–37,4	308,5–901,8	21.01.2004
h2047_0000	73552	974	69	11,8–14,6	293,5–364,3	18.08.2005
h2025_0000	73592	967	68	11,8–14,5	294,6–361,2	12.08.2005
h2014_0000	88696	1228	72	11,9–15,8	295,6–391,7	09.08.2005
h3148_0000	72264	939	67	13,6–12,4	338,2–310,1	23.06.2006
h3137_0000	75736	1002	68	14,2–12,3	353,1–306,8	20.06.2006
h1089_0000	77552	994	66	14,2–11,5	351,6–284,4	23.11.2004
h3115_0000	68440	928	70	14,8–12,3	370,4–306,5	13.06.2006

Tabelle 18: Kenndaten des jeweiligen Nadirkanals der 16 verwendeten Bildstreifen

Master-Streifen	Überlappung mit	Auflösung Vorentzerrung [m]
h1232_0000	h1221_0000, (h0143_0009)	35 (50)
h1221_0000	h2091_0000, (h0143_0009)	30 (50)
h2091_0000	h2069_0000, (h0143_0009)	30 (50)
h0143_0009	h2069_0000, h1177_0001, h1437_0001, h0037_0000	100
h2069_0000	h1177_0001, (h1437_0001)	30
h1177_0001	h3203_0000, h1437_0001	50
h3203_0000	h1437_0001, h2047_0000	50
h1437_0001	h2047_0000, h0037_0000, h2025_0000	50
h0037_0000	h2025_0000, h2014_0000, h3148_0000	40
h2047_0000	h0037_0000	40
h2025_0000	h2014_0000	30
h2014_0000	h3148_0000	35
h3148_0000	h3137_0000	30
h3137_0000	h1089_0000	30
h1089_0000	h3115_0000	30
h3115_0000		30

Tabelle 19: Die Teilblöcke mit den Überlappungsverhältnissen und verwendeten Auflösungen

Ein solch umfangreicher und heterogener Block erfordert mehr Planung als der Iani Chaos-Block aus dem vorherigen Abschnitt. Nach einer ersten Sichtung des Datenmaterials müssen die Teilblöcke aufgestellt werden. Nach der in 5.3.1 aufgestellten Regel müssen bei 16 Einzelstreifen insgesamt auch 16 Teilblöcke erstellt werden, wobei jeder Einzelstreifen jeweils einmal als Master-Streifen fungiert. Bei diesem Block sind die Überlappungsverhältnisse etwas komplizierter, so dass der betreffende Master-Streifen sich oftmals nicht nur mit seinem direkten Nachbarn überlappt. In Tabelle 19 sind für alle 16 Streifen die Überlappungen aufgeführt. Der letzte Streifen (h3115_0000) wird wie immer separat prozessiert. Die Bildstreifen in Klammern geben an, dass zwar technisch gesehen eine Überlappung vorhanden ist, diese aber nicht notwendigerweise sinnvoll verwertbar ist. Das kann daran liegen, dass die Überlappung nur minimal oder durch andere Streifen gesichert ist und der Maßstabsunterschied sehr groß ist, so dass die Auflösung bei der Vorentzerrung gesenkt werden müsste. Der entsprechende Wert ist in der dritten Spalte in Klammern angegeben. Es wurden immer alle fünf panchromatischen Kanäle verwendet, nur in h0143_0009 und h2091_0000 standen nur ND, S1 und S2 zur Verfügung.

Das wichtigste Ergebnis bei der Prozessierung eines Blockverbandes ist die Anzahl der Tupel, die im Überlappungsbereich zwei (oder mehr) Streifen miteinander verknüpfen. In Tabelle 20 sind die Tupel aufgezählt, die zwischen einzelnen Streifenpaaren generiert worden sind. Es wird dabei nicht nach der Anzahl der Strahlen unterschieden, so dass hier jeweils die Gesamtzahl aller Zwei- bis Zehnstrahlpunkte angegeben ist, die zwei Streifen miteinander verbinden. Bei der Durchsicht der Ergebnisse aus Tabelle 20 fällt auf, dass neben vielen guten Verknüpfungen mit bis zu 9800 Punkten einige Streifenpaare vorhanden sind, zwischen denen nur sehr wenige Punkte gefunden wurden. Das Gebiet wurde systematisch von Ost nach West untersucht, wobei insbesondere die Schwachstellen näher analysiert wurden. Zunächst ist zu beobachten, dass zwischen den fünf Außenstreifen am östlichen Rand (h2014_0000–h3115_0000) genügend Punkte gefunden wurden. Zwischen h2025_0000 und h2014_0000 wurden lediglich 76 Punkte gefunden, was aber, wie in Abb. 46 zu sehen ist, durch die minimale Überdeckung zu erklären ist. Der Streifen h2025_0000 und die eben erwähnten fünf Streifen sind aber über h0037_0000 ausreichend an den Gesamtblock angeschlossen. Auch h0037_0000 hat noch eine kleine Überlappung mit h3148_0000, so dass auch dort 67 Punkte gefunden wurden. Die beiden Streifen h0037_0000 und h1437_0001 sind sich bezüglich Aufnahmegeometrie und Radiometrie sehr ähnlich, obwohl etwas mehr als ein Jahr zwischen diesen Aufnahmen liegt. Da auch eine ausreichende Überlappung vorhanden ist, wurden zwischen diesen beiden annähernd 2500 Punkte gefunden. Die Verknüpfung von h1437_0001 mit h2047_0000 und h2025_0000 scheint nicht gelungen zu sein, obwohl eine Überdeckung vorhanden ist (s. Abb. 47).

Master	Partner	Tupel	Master	Partner	Tupel
h1232_0000	h1221_0000	1376	h1437_0001	h2047_0000	2
h1221_0000	h2091_0000	2858	h1437_0001	h0037_0000	2485
h2091_0000	h2069_0000	1081	h1437_0001	h2025_0000	76
h0143_0009	h2069_0000	388	h0037_0000	h2025_0000	9799
h0143_0009	h1177_0001	418	h0037_0000	h2014_0000	3743
h0143_0009	h1437_0001	1350	h0037_0000	h3148_0000	67
h0143_0009	h0037_0000	86	h2047_0000	h0037_0000	1313
h2069_0000	h1177_0001	536	h2025_0000	h2014_0000	76
h1177_0001	h3203_0000	121	h2014_0000	h3148_0000	1861
h1177_0001	h1437_0001	66	h3148_0000	h3137_0000	3532
h3203_0000	h1437_0001	2	h3137_0000	h1089_0000	7406
h3203_0000	h2047_0000	28	h1089_0000	h3115_0000	2538

Tabelle 20: Anzahl Tupel, die zwei Streifen miteinander verknüpfen

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass der Überlappungsbereich von h2047_0000 ein Gebiet abdeckt, das kaum Textur aufweist. Bei der Aufnahme von Streifen h2025_0000 waren sehr gute atmosphärische Bedingungen vorhanden, und die Auflösung ist hervorragend, denn auch die Stereokanäle liegen als MPF 1 vor. Daher sind auch an den texturarmen Flanken des Vulkans noch Strukturen im Bild zu erkennen. Die Bildqualität des h1437_0001 ist trüber, und auch die ursprüngliche Auflösung ist deutlich geringer, so dass weite Gebiete als graue Flächen erscheinen, die visuell nur an vereinzelt sehr markanten Punkten mit dem h2025_0000 korrespondieren. Eine weitere große Beeinträchtigung sind

die verschiedenen Beleuchtungsrichtungen: In h1437_0001 kommt die Sonneneinstrahlung aus Südosten, während sie in h2025_0000 aus Südwesten kommt. Außerdem hat die Sonne in h2025_0000 eine sehr niedrige Elevation, so dass sich sehr lange Schatten ergeben. In Abb. 48 und Abb. 49 werden diese Umstände verdeutlicht. In der ersten Abbildung werden insbesondere die unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse und die langen Schatten in h2025_0000 sichtbar.



Abb. 47: Überdeckungsverhältnisse von h1437_0001, h2047_0000 und h2025_0000

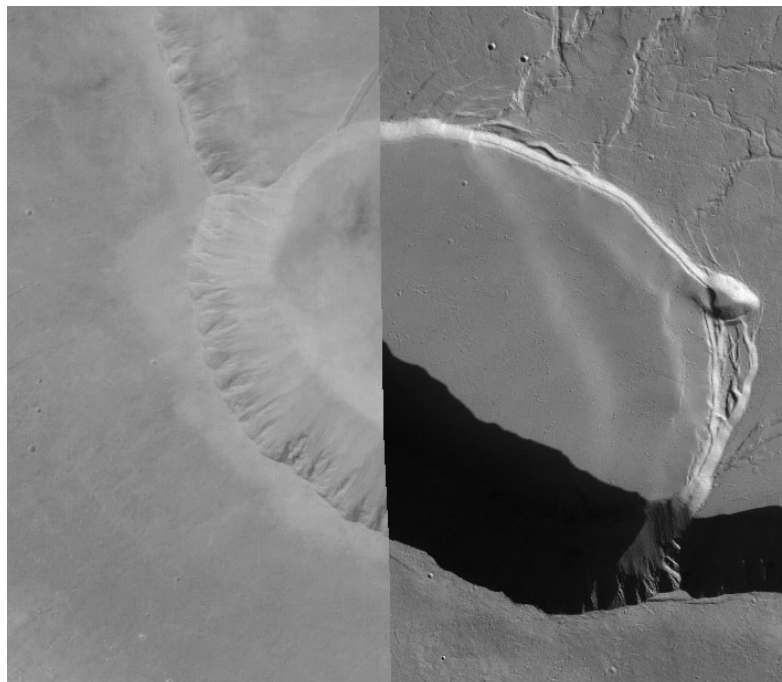


Abb. 48: Unterschiede bezüglich Beleuchtungsrichtung und Details zwischen h1437_0001 und h2025_0000

In Abb. 49 werden die Unterschiede bezüglich Detailschärfe sichtbar. In h2025_0000 können noch Oberflächenstrukturen erkannt werden, während in h1437_0001 kaum noch etwas zu erkennen ist. Außerdem sind die Strukturen radiometrisch invertiert abgebildet, was theoretisch vom NCC nicht berücksichtigt werden kann. In weiten Teilen, in denen auch in h2025_0000 wenig Textur abgebildet wird, bleibt in h1437_0000 nur eine graue Fläche. Selbst zehnfach vergrößerte Korrelationsfenster (350×350 Pixel) enthalten oftmals nicht genügend Grauwertvariationen. Diese Faktoren haben zur Folge, dass sich die Bilder zu stark unterscheiden, um zuverlässig korrespondierende Punkte zu finden.

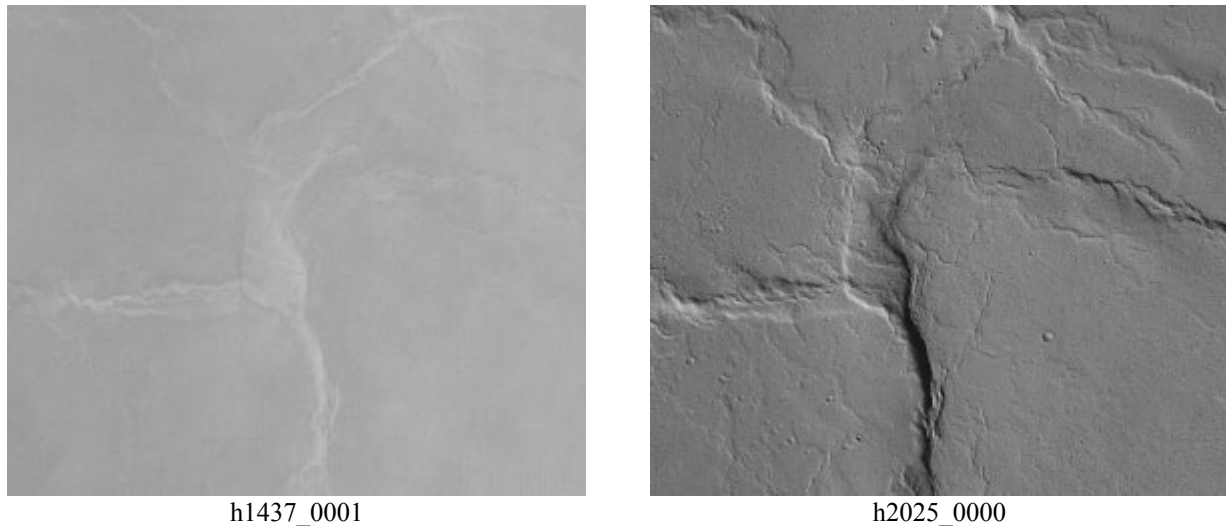


Abb. 49: Unterschiede in der Detailauflösung

Wenn man die Bildstreifen h3203_0000, h1177_000, h2069_0000 und h0143_0009 weiter westlich betrachtet, so ist in diesem Bereich die Verknüpfung zu gering. Einzig h0143_0009 ist mit h1437_0001 mit 1350 Punkten verbunden. Bei den anderen Paaren sind bestenfalls einige hundert Punkte gefunden worden, was bei den riesigen Flächen nicht befriedigend ist. Die Gründe sind in diesen Fällen wieder die gleichen: Kaum Textur, schlechte Bildqualität (wenig Kontrast) und völlig verschiedene Beleuchtungsverhältnisse. Erst die Streifen vom Westrand sind wieder ausreichend miteinander verknüpft.

Insgesamt betrachtet lässt sich mit diesem Ergebnis kein ausreichend verknüpfter Block erstellen. Zwar gibt es einige Verbindungen über h0143_0009, h1437_0001 und h0037_0000, aber letztendlich ist der Mittelteil nur ungenügend mit Punkten besetzt, so dass keine stabile Verknüpfung aufgebaut werden konnte. Es bleibt zu überlegen, wie dieser Mangel behoben werden kann. Zunächst muss von dem Geländetyp ausgegangen werden, denn dieser ist mit seinen über weite Strecken sehr texturarmen Bereichen grundsätzlich sehr problematisch. Da an dieser Tatsache nichts verändert werden kann, wird für dieses Gebiet optimales Bildmaterial benötigt. Dies bedeutet, dass unter klaren atmosphärischen Bedingungen sehr hochaufgelöste Bilder aufgenommen werden müssen. Da sich auch die Beleuchtungsverhältnisse als kritisch herausgestellt haben, müssten die Bilder im Idealfall nacheinander wie im Fall „Iani Chaos“ aus dem vorherigen Abschnitt aufgenommen werden. Zumindest müsste darauf geachtet werden, dass die Beleuchtungsverhältnisse ähnlich sind, falls die Aufnahmezeitpunkte doch länger auseinander liegen. Zwar hat sich Mutual Information bei globalen radiometrischen Unterschieden als geeignetes Ähnlichkeitsmaß erwiesen (s. 3.1.3), in diesem Fall würde es aber trotzdem nur bedingt weiterhelfen. Bei solch langen Schatten wie in Abb. 48 hat sich de facto der Bildinhalt geändert hat. Auch bei schwierigen atmosphärischen Bedingungen und texturarmen Bereichen würde MI keine Vorteile bringen.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Prozessierungskette für die operationelle automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten für HRSC-Bilder der Mars Express-Mission erstellt. Der zentrale Punkt dieser Verarbeitungskette stellt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Digitalen Bildzuordnung dar. Ein wesentlicher Aspekt bei der Verknüpfungspunktsuche ist die Vorentzerrung der Bilder. Damit werden die speziellen geometrischen Eigenschaften der HRSC-Daten wie Maßstabsunterschiede wegen elliptischer Flugbahn, Verzerrungen durch nicht optimal angepasste Integrationszeiten und Makropixelbildung weitestgehend beseitigt. Während die Maßstabsunterschiede durch Makropixelbildung mit Resampling der Originaldaten beseitigt werden könnten, stellen insbesondere die ersten beiden Bildverzerrungen ein Problem bei der Digitalen Bildzuordnung dar, die aber durch die Vorentzerrung beseitigt werden.

Die Bildzuordnung wird zunächst in einem pyramidenbasierten Ansatz mit dem Normalisierten Kreuzkorrelationskoeffizienten paarweise vom Nadirkanal zu den anderen vier panchromatischen Kanälen S1, S2, P1 und P2 durchgeführt. Durch die Vorentzerrung mit dem MOLA-DGM werden die Parallaxen stark verkleinert, so dass große Korrelationsfenster verwendet werden können. Diese sind wegen der oftmals nur geringen Textur in den Bildern auch notwendig. Anschließend wird zur Genauigkeitssteigerung und Konsistenzprüfung ein Multi-Image LSM durchgeführt. Wie die Untersuchungen anhand von 45 Testbildstreifen in dieser Arbeit gezeigt haben, wird für die Strahlenschnitte im Durchschnitt eine hervorragende relative Genauigkeit von etwa 4 m in der Lage und 16 m in der Höhe erreicht. Dies entspricht ungefähr 1/8 Pixel in der Lage bzw. 1/2 Pixel in der Höhe bezüglich der durchschnittlichen Auflösung der Vorentzerrung von 30 m. Der Anteil der durch die Bündelausgleichung eliminierten groben Fehler liegt bei unter 10%, was bei den anspruchsvollen HRSC-Daten ein sehr guter Wert ist. Für die geometrische Stabilität der Punkte ist noch der hohe Anteil von ca. 75% an Fünfstrahlpunkten ein wichtiger Faktor.

Bei der Prozessierung von Blöcken hat sich gezeigt, dass mit einem Verband aus untereinander homogenen Bildstreifen bezüglich Bildqualität und Radiometrie sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Dies bedeutet konkret, dass in den Überlappungsbereichen flächendeckend Verknüpfungspunkte gefunden wurden. Im zweiten Beispiel „Olympus Mons“ sind die Grenzen des Verfahrens aufgezeigt worden. In dem untersuchten Gebiet gibt es sehr weitläufige Areale, die nur wenig Textur aufweisen. Hier wird eine optimale Bildqualität bei hoher Auflösung für eine zuverlässige Bildzuordnung benötigt, die bei den vorliegenden Bildstreifen nicht immer zur Verfügung stand. Daher konnte für dieses Beispiel kein stabil zusammenhängender Block für die Bündelausgleichung erstellt werden. Neben der nicht ausreichenden Bildqualität waren die unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen ein störender Faktor. Da die Aufnahmen der Bildstreifen aus dem Beispiel über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren erfolgten, lagen teilweise völlig verschiedene Sonnenstände vor. Die radiometrischen Verhältnisse waren dadurch zwischen zwei überlappenden Streifen manchmal gegensätzlich, was mit dem hier verwendeten Ansatz nicht berücksichtigt werden kann. Um die radiometrischen Unterschiede in Zukunft besser handhaben zu können, wäre eine Untersuchung mit nicht-parametrischen Bildtransformationen interessant (Zabih & Woodfill 1994), die das Bild so verändern, dass sie von der Radiometrie unabhängig erscheinen. Eine weitere Möglichkeit besteht mit dem Ansatz eines Reshading (Dorrer et al. 2005), bei dem über ein vorhandenes DGM und einem radiometrischen Modell der Schattenwurf neu berechnet wird. Dieses Verfahren liegt in der Prozessierungskette allerdings hinter der Bündelausgleichung, da ein hochgenaues DGM benötigt wird, so dass ein iteratives Vorgehen sinnvoll ist.

Ein zweiter Schwerpunkt dieser Arbeit ist eine Untersuchung zur Bildrekonstruktion der HRSC-Daten zur Verbesserung der Digitalen Bildzuordnung. Die Störsignale wurden dabei in die zwei Komponenten Kompressionsartefakte und Rauschen unterteilt. Anhand des einzigen unkomprimiert zur Erde übertragenden Bildstreifens konnte gezeigt werden, dass die in der HRSC implementierte Bildkompression mit einer DCT einen sehr geringen aber nachweisbaren negativen Einfluss auf die Strahlenschnittgenauigkeit hat. Es wurde gezeigt, dass das implementierte Programm zur Verminderung der Kompressionsartefakte mit Testbildern sehr gute Ergebnisse erzielen kann. Im praktischen Test mit HRSC-Daten konnte jedoch keine Verbesserung der Ergebnisse festgestellt werden, so dass auf die Bearbeitung der Kompressionsartefakte bei der operationellen Prozessierung verzichtet wird. Die Farbkanäle weisen im Vergleich zu den panchromatischen Kanälen sehr viel höhere Kompressionsraten auf, und die Blockartefakte treten in diesen deutlicher zutage. Anhand eines Beispiels wurde gezeigt, dass die Bildqualität in den Farbkanälen zur Erzeugung hochwertiger Farbborthophotos gesteigert werden kann.

Der zweite Teil der Untersuchung zur Bildrekonstruktion bestand in der Reduzierung des Rauschens. Neben einem klassischen Gauß-Filter wurden auch die zwei aktuellen Methoden Anisotrope Diffusion und Non-Local Means näher betrachtet. Bei den Testbildern wurden mit den neueren Verfahren sowohl qualitativ als auch quantitativ bessere Ergebnisse als mit dem Gauß-Filter erzielt. Im operationellen Praxistest mit HRSC-Daten konnten bei minimaler Filterung mit einem 3×3 Gauß-Filter im Vergleich zur ungefilterten Version im Durchschnitt 50% mehr Verknüpfungspunkte gefunden werden, womit die Bündelausgleichung sowohl bei der relativen als auch bei der absoluten Orientierung je nach Datensatz deutlich zuverlässiger arbeiten kann. Für die Anisotrope Diffusion konnte erst

bei stärkerer Filterung ein Vorteil nachgewiesen werden. Für die operationelle Prozessierung ist der 3×3 Gauß-Filter allerdings ausreichend. Für die Zukunft wäre es wünschenswert, eine Methode zur Bildfilterung zu finden, die keinen negativen Einfluss auf die Strahlenschnittgenauigkeit hat. Die Filterung bewirkt zwar nur einen sehr geringen aber signifikanten Genauigkeitsverlust. Erstrebenswert ist es, überhaupt keine Verschlechterung zu erhalten.

Die Mars Express-Mission wird offiziell noch bis Mai 2009 laufen, und über eine weitere Verlängerung wird im Herbst 2008 entschieden. Da sich die Sonde in einem guten Zustand befindet und noch etliche Lücken auf der Oberfläche mit der HRSC zu schließen sind, wird auf eine positive Bewertung der ESA für die Mission gehofft. Mit steigender Orbitanzahl können immer öfter Blöcke gebildet werden, die interessante Gebiete überdecken. Wenn in Zukunft vermehrt Lücken geschlossen werden, kann die Prozessierung eines geschlossenen Blockes geplant werden, womit die Ausgleichung eines den kompletten Mars umspannenden Blocks gemeint ist. Wie in (Ebner 1969) gezeigt wurde, bietet eine solche Konfiguration eine außerordentlich hohe geometrische Stabilität. Bereits in den späten 60er Jahren wurde über ein solch hochgenaues Referenznetz für den Mond nachgedacht (Brown 1968). Nach Abschätzung des Autors müssten für dieses Vorhaben etwa 360 Bildstreifen vorhanden sein, um den Marsäquator einmal zu umspannen. Über die Pole würden etwa bereits 30 durchschnittlich lange HRSC-Bildstreifen ausreichen. Mit dem in 5.3.1 vorgestellten Konzept der Teilblöcke ist dieses Vorhaben theoretisch schon gegenwärtig durchführbar.

Um Abdeckungslücken der HRSC zu beseitigen, ist es auch eine Überlegung wert, diese mit Bilddaten anderer Marsmissionen zu füllen. Die Schwierigkeit bei einem solchen Vorgehen besteht darin, geeignetes Bildmaterial zu finden, das mit den HRSC-Daten einigermaßen korrespondiert. Wie in (Jaumann et al. 2007) gezeigt wurde, decken die HRSC-Bilder als einzige Mission den Bereich zwischen 10 bis 50 Metern Auflösung ab. Andere Kameras wie MOC oder HiRISE besitzen entweder eine sehr viel höhere Auflösung, oder es wird wie z.B. bei Viking nur eine mittlere Auflösung von 100 bis 300 Metern erzielt. Einzig THEMIS VIS an Bord von Mars Odyssey mit einer Auflösung von 18 Metern und besser ist mit den HRSC-Daten vergleichbar. Technisch gesehen ist das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren darauf ausgelegt, auch Multi-Missionsdaten miteinander zu prozessieren. Es genügt, mit einer entsprechenden Software ein Orthophoto aus den THEMIS-Daten im VICAR-Format zu erzeugen. Der Erfolg der Zuordnung ist dann vom Bildinhalt, den radiometrischen Eigenschaften und der Qualität der Äußerer Orientierung abhängig.

Literaturverzeichnis

Verwendete Abkürzungen:

AAS/AIAA	American Astronautical Society/American Institute of Aeronautics and Astronautics
ACM	Association for Computing Machinery
Adv. Space Res.	Advances in Space Research
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
Conf.	Conference
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DGK-C	Deutsche Geodätische Kommission Reihe C
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation
Geophys. Res. Lett.	Geophysical Research Letters
Hrsg.	Herausgeber
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGARSS	International Geoscience and Remote Sensing Symposium
Int.	International
IntArchPhRS	International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing
ISBN	Internationale Standardbuchnummer
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ISRR	International Symposium of Robotics Research
J.	Journal
J. Geophys. Res.	Journal of Geophysical Research
LNCS	Lecture Notes in Computer Science
Lunar Planet. Sci.	Lunar and Planetary Science Conference
OEEPE	Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales
PE&RS	Photogrammetric Engineering & Remote Sensing
Proc.	Proceedings
Space Sci. Rev.	Space Science Reviews
SPIE	International Society for Optical Engineering
Trans.	Transactions

Abshire, J. B., X. Sun, R. S. Afzal (2000): Mars Orbiter Laser Altimeter: Receiver Model and Performance Analysis, *Applied Optics*, (39) 15, 2449–2460.

Ackermann, F. (1984): Digital Image Correlation: Performance and Potential Application in Photogrammetry, *Photogrammetric Record*, (11) 64, 429–439.

Ackermann, F. & M. Hahn (1991): Image pyramids for digital photogrammetry, *Digital Photogrammetric Systems*, 43–58.

Acton, S. T. (2000): Locally Monotonic Diffusion, *IEEE Trans. on Signal Processing*, (48) 5, 1379–1389.

Acuna, M. H., J. E. P. Connerney, P. Wasilewski, R. P. Lin, K. A. Anderson, C. W. Carlson, J. McFadden, D. W. Curtis, D. Mitchell, H. Reme, C. Mazelle, J. A. Sauvaud, C. d'Uston, A. Cros, J. L. Medale, S. J. Bauer, P. Cloutier, M. Mayhew, D. Winterhalter, N. F. Ness (1998): Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission, *Science*, (279) 5357, 1676–1680.

Acuna, M. H., J. E. P. Connerney, P. Wasilewski, R. P. Lin, D. Mitchell, K. A. Anderson, C. W. Carlson, J. McFadden, H. Reme, C. Mazelle, D. Vignes, S. J. Bauer, P. Cloutier, N. F. Ness (2001): Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23403–23417.

Afzal, R. S. (1994): Mars Observer Laser Altimeter: Laser transmitter, *Applied Optics*, (33) 15, 3184–3188.

Agouris, P. & T. Schenk (1992): Multiple Image Matching, *IntArchPhRS*, (29) 3, 802–807.

Agouris, P. & T. Schenk (1996): Automated Aerotriangulation Using Multiple Image Multipoint Matching, *PE&RS*, (62) 6, 703–710.

- Aharonson, O., M. T. Zuber, D. H. Rothman (2001): Statistics of Mars' topography from the Mars Orbiter Laser Altimeter: Slopes, correlations, and physical models, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23723–23736.
- Ahmed, N., T. Natarajan, K. R. Rao (1974): Discrete Cosine Transform, *IEEE Trans. on Computers*, (23) 1, 90–93.
- Ahuja, R. K., T. L. Magnanti, J. B. Orlin (1993): *Network flows: theory, algorithms, and applications*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River NJ, USA.
- Albee, A. L., R. E. Arvidson, F. D. Palluconi (1992): Mars Observer mission, *J. Geophys. Res.*, (97) E5, 7665–7680.
- Albee, A. L., F. D. Palluconi, R. E. Arvidson (1998): Mars Global Surveyor mission: Overview and status, *Science*, (279) 5357, 1671–1672.
- Albee, A. L., R. E. Arvidson, F. D. Palluconi, T. Thorpe (2001): Overview of the Mars Global Surveyor mission, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23291–23316.
- Albertz, J., F. Scholten, H. Ebner, C. Heipke, G. Neukum (1993): Two Camera Experiments on the Mars 94/96 Missions, *Geo-Informationssysteme*, (6) 4, 11–16.
- Albertz, J., H. Ebner, G. Neukum (1996): Camera Experiment on the Mars96 Mission – A Photogrammetric and Cartographic View of the Project, *IntArchPhRS*, (31) 4, 58–63.
- Alter, F., S. Durand, J. Froment (2005): Adapted Total Variation for Artifact Free Decompression of JPEG Images, *J. of Mathematical Imaging and Vision*, (23) 2, 199–211.
- Archinal, B. A., E. M. Lee, R. L. Kirk, T. C. Duxbury, R. M. Sucharskia, D. A. Cook, J. M. Barrett (2004): A new Mars Digital Image Model (MDIM 2.1) Control Network, *IntArchPhRS*, (35) 4, 863–868.
- Arvidson, R. E., S. W. Squyres, R. C. Anderson, J. F. Bell III, D. Blaney, J. Brückner, N. A. Cabrol, W. M. Calvin, M. H. Carr, P. R. Christensen, B. C. Clark, L. Crumpler, D. J. Des Marais, P. A. de Souza Jr., C. d'Uston, T. Economou, J. Farmer, W. H. Farrand, W. Folkner, M. P. Golombek, S. Gorevan, J. A. Grant, R. Greeley, J. Grotzinger, E. Guinness, B. C. Hahn, L. Haskin, K. E. Herkenhoff, J. A. Hurowitz, S. Hviid, J. R. Johnson, G. Klingelhöfer, A. H. Knoll, G. Landis, C. Leff, M. Lemmon, R. Li, M. B. Madsen, M. C. Malin, S. M. McLennan, H. Y. McSween, D. W. Ming, J. Moersch, R. V. Morris, T. Parker, J. W. Rice Jr., L. Richter, R. Rieder, D. S. Rodionov, C. Schröder, M. Sims, M. Smith, P. Smith, L. A. Soderblom, R. Sullivan, S. D. Thompson, N. J. Tosca, A. Wang, H. Wänke, J. Ward, T. Wdowiak, M. Wolff, A. Yen (2006): Overview of the Spirit Mars Exploration Rover Mission to Gusev Crater: Landing site to Backstay Rock in the Columbia Hills, *J. Geophys. Res.*, (111) E2, CiteID E02S01.
- Audette, M. A., F. P. Ferrie, T. M. and Peters (2000): An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging, *Medical Image Analysis*, (4) 3, 201–217.
- Babaud, J., A. P. Witkin, M. Baudin, R. O. Duda (1986): Uniqueness of the Gaussian kernel for scale-space filtering, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (8) 1, 26–33.
- Badhwar, G. D. (2004): Martian Radiation Environment Experiment (MARIE), *Space Sci. Rev.*, (110) 1–2, 131–142.
- Baker, H. H. & T. O. Binford (1981): Depth from edge and intensity based stereo, *Proc. 7th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, 631–636.
- Barabash, S., R. Lundin, H. Andersson, J. Gimholt, M. Holmström, O. Norberg, M. Yamauchi, K. Asamura, A. J. Coates, D. R. Linder, D. O. Kataria, C. C. Curtis, K. C. Hsieh, B. R. Sandel, A. Fedorov, A. Grigoriev, E. Budnik, M. Grande, M. Carter, D. H. Reading, H. Koskinen, E. Kallio, P. Riihela, T. Säles, J. Kozyra, N. Krupp, S. Livi, J. Woch, J. Luhmann, S. McKenna-Lawlor, S. Orsini, R. Cerulli-Irelli, M. Maggi, A. Morbidini, A. Mura, A. Milillo, E. Roelof, D. Williams, J.-A. Sauvaud, J.-J. Thocaven, T. Moreau, D. Winningham, R. Frahm, J. Scherrer, J. Sharber, P. Wurz, P. Bochslers (2004): ASPERA-3: Analyser of Space Plasmas and Energetic Ions for Mars Express, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 121–139.
- Barash, D. (2005): Nonlinear diffusion filtering on extended neighborhood, *Applied Numerical Mathematics*, (52) 1, 1–11.
- Barnard, S. T. & M. A. Fischler (1982): Computational Stereo, *ACM Computing Surveys*, (14) 4, 553–572.
- Barnard, S. T. (1989): Stochastic stereo matching over scale, *Int. J. of Computer Vision*, (3) 1, 17–32.
- Bay, H., T. Tuytelaars, L. Van Gool (2006): SURF: Speeded Up Robust Features, *Proc. 9th European Conf. on Computer Vision*, Graz, May 7, (13), 404–417.
- Beaton, A. E. & J. W. Tukey (1974): The Fitting of Power Series, Meaning Polynomials, Illustrated on Band-Spectroscopic Data, *Technometrics*, (16) 2, 147–185.

- Belhumeur, P. N. & D. Mumford (1992): A Bayesian treatment of the stereo correspondence problem using half-occluded regions, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition 1992*, 506–512.
- Bertaux, J.-L., D. Fonteyn, O. Korablev, E. Chassefière, E. Dimarellis, J. P. Dubois, A. Hauchecorne, F. Lefèvre, M. Cabane, P. Rannou, A. C. Levasseur-Regourd, G. Cernogora, E. Quemerais, C. Hermans, G. Kockarts, C. Lippens, M. De Maziere, D. Moreau, C. Muller, E. Neefs, P.C. Simon, F. Forget, F. Hourdin, O. Talagrand, V. I. Moroz, A. Rodin, B. Sandel, A. Stern (2004): SPICAM: Studying the Global Structure and Composition of the Martian Atmosphere, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 95–120.
- Bertaux, J.-L., F. Leblanc, S. Perrier, E. Quemerais, O. Korablev, E. Dimarellis, A. Reberac, F. Forget, P. C. Simon, S. A. Stern, Bill Sandel, the SPICAM team (2005a): Nightglow in the Upper Atmosphere of Mars and Implications for Atmospheric Transport, *Science*, (307) 5709, 566–569.
- Bertaux J.-L., F. Leblanc, O. Witasse, E. Quemerais, J. Lilensten, S. A. Stern, B. Sandel, O. Korablev (2005b): Discovery of an aurora on Mars, *Nature*, (435) 7043, 790–794.
- Bertaux, J.-L., O. Korablev, D. Fonteyn, S. Guibert, E. Chassefière, F. Lefèvre, E. Dimarellis, J. P. Dubois, A. Hauchecorne, M. Cabane, P. Rannou, A. C. Levasseur-Regourd, G. Cernogora, E. Quémerais, C. Hermans, G. Kockarts, C. Lippens, M. De Maziere, D. Moreau, C. Muller, E. Neefs, P. C. Simon, F. Forget, F. Hourdin, O. Talagrand, V. I. Moroz, A. Rodin, B. Sandel, S. A. Stern (2005c): Global structure and composition of the martian atmosphere with SPICAM on Mars Express, *Adv. Space Res.*, (35) 1, 31–36.
- Bibring, J.-P., A. Soufflot, M. Berthé, Y. Langevin, B. Gondet, P. Drossart, M. Bouyé, M. Combes, P. Puget, A. Semery, G. Bellucci, V. Formisano, V. Moroz, V. Kottsov, G. Bonello, S. Erard, O. Forni, A. Gendrin, N. Manaud, F. Poulet, G. Poulleau, T. Encrenaz, T. Fouchet, R. Melchiori, F. Altieri, N. Ignatiev, D. Titov, L. Zasova, A. Coradini, F. Capacionni, P. Cerroni, S. Fonti, N. Mangold, P. Pinet, B. Schmitt, C. Sotin, E. Hauber, H. Hoffmann, R. Jaumann, U. Keller, R. Arvidson, J. Mustard, F. Forget (2004): OMEGA: Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 37–49.
- Bibring, J.-P., Y. Langevin, F. Mustard, F. Poulet, R. Arvidson, A. Gendrin, B. Gondet, N. Mangold, P. Pinet, F. Forget, the OMEGA team (2006): Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data, *Science*, (312) 5772, 400–404.
- Black, M. J., G. Sapiro, D. H. Marimont, D. Heeger (1998): Robust anisotropic diffusion, *IEEE Trans. on Image Processing*, (7) 3, 421–432.
- Black, M. J., G. Sapiro (1999): Edges as Outliers: Anisotropic Smoothing using Local Image Statistics, *Proc. Scale-Space'99, LNCS*, (1682), 259–270.
- Blasius, K. R., A. V. Vertrone, B. H. Lewis, M. D. Martin (1982): Viking orbiter stereo imaging catalog, NASA-CR-3501.
- Bolles, R. C., H. H. Baker, M. J. Hannah (1993): The JISCT stereo evaluation, *DARPA Image Understanding Workshop*, 263–274.
- G. Borgefors (1988): Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (10) 6, 849–865.
- Boykov, Y., O. Veksler, R. Zabih (1998): A Variable Window Approach to Early Vision, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (20) 12, 1283–1294.
- Boykov, Y., O. Veksler, R. Zabih (2001): Fast approximate energy minimization via graph cuts, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (23) 11, 1222–1239.
- Boynton, W. V., J. I. Trombka, W. C. Feldman, J. R. Arnold, P. A. J. Englert, A. E. Metzger, R. C. Reedy, S. W. Squyres, H. Wänke, S. H. Bailey, J. Brückner, J. L. Callas, D. M. Drake, P. Duke, L. G. Evans, E. L. Haines, F. C. McCloskey, H. Mills, C. Shinohara, R. Starr (1992): Science applications of the Mars Observer gamma ray spectrometer, *J. Geophys. Res.*, (97) E5, 7681–7698.
- Boynton, W. V., W. C. Feldman, S. W. Squyres, T. H. Prettyman, J. Brückner, L. G. Evans, R. C. Reedy, R. Starr, J. R. Arnold, D. M. Drake, P. A. J. Englert, A. E. Metzger, I. Mitrofanov, J. I. Trombka, C. d'Uston, H. Wänke, O. Gasnault, D. K. Hamara, D. M. Janes, R. L. Marcialis, S. Maurice, I. Mikheeva, G. J. Taylor, R. Tokar, C. Shinohara (2002): Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits, *Science*, (297) 5578, 81–85.

- Boynton, W. V., W. C. Feldman, I. G. Mitrofanov, L. G. Evans, R. C. Reedy, S. W. Squyres, R. Starr, J. I. Trombka, C. d'Uston, J. R. Arnold, P. A. J. Englert, A. E. Metzger, H. Wänke, J. Brückner, D. M. Drake, C. Shinohara, C. Fellows, D. K. Hamara, K. Harshman, K. Kerry, C. Turner, M. Ward, H. Barthe, K. R. Fuller, S. A. Storms, G. W. Thornton, J. L. Longmire, M. L. Litvak, A. K. Ton'chev (2004): The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer instrument suite, *Space Sci. Rev.*, (110) 1–2, 37–83.
- Brand, R. & C. Heipke (1998): A system for automatic aerial triangulation, *IntArchPhRS*, (32) 2, 27–32.
- Brown, D. C. (1968): A Unified Lunar Control Network, *Photogrammetric Engineering*, (34) 12, 1272–1292.
- Brown, L. G. (1992): A survey of image registration techniques, *ACM Computing Surveys*, (24) 4, 325–376.
- Buades, A., B. Coll, J. M. and Morel (2005): A review of image denoising algorithms with a new one, *Multiscale Modeling & Simulation*, (4) 2, 490–530.
- Canny, J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (8) 6, 679–698.
- Caplinger, M. A. & M. C. Malin (2001): Mars Orbiter Camera geodesy campaign, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23595–23606.
- Caplinger, M. A. (2003): Mass Production of DEMs from MOC Stereo Pairs, *Extraterrestrial Mapping Workshop „Advances in Planetary Mapping 2003“*, Houston TX.
- Carsenty, U., J. Flohrer, D. Jobs, K.-D. Matz, I. Sebastian, K. Wesemann (1997): HRSC FM1 and FM2 Calibration Document (Final Report), Technical Report TN-WM-5000 PE/007, DLR Institut für Planetenerkundung, Berlin-Adlershof.
- Chicarro, A., P. Martin, R. Trautner (2004): The Mars Express Mission: An Overview, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 3–13.
- Christensen, P. R., D. L. Anderson, S. C. Chase, R. T. Clancy, R. N. Clark, B. J. Conrath, H. H. Kieffer, R. O. Kuzmin, M. C. Malin, J. C. Pearl, T. L. Roush, M. D. Smith (1998): Results from the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer, *Science*, (279) 5357, 1692–1698.
- Christensen, P. R., J. L. Bandfield, V. E. Hamilton, S. W. Ruff, H. H. Kieffer, T. N. Titus, M. C. Malin, R. V. Morris, M. D. Lane, R. L. Clark, B. M. Jakosky, M. T. Mellon, J. C. Pearl, B. J. Conrath, M. D. Smith, R. T. Clancy, R. O. Kuzmin, T. Roush, G. L. Mehall, N. Gorelick, K. Bender, K. Murray, S. Dason, E. Greene, S. Silverman, M. Greenfield (2001): Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23823–23871.
- Christensen, P. R., J. L. Bandfield, J. F. Bell III, N. Gorelick, V. E. Hamilton, A. Ivanov, B. M. Jakosky, H. H. Kieffer, M. D. Lane, M. C. Malin, T. McConnochie, A. S. McEwen, H. Y. McSween Jr., G. L. Mehall, J. E. Moersch, K. H. Nealson, J. W. Rice Jr., M. I. Richardson, S. W. Ruff, M. D. Smith, T. N. Titus, M. B. Wyatt (2003): Morphology and Composition of the Surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS Results, *Science*, (300) 5628, 2056–2061.
- Christensen, P. R., B. M. Jakosky, H. H. Kieffer, M. C. Malin, H. Y. McSween Jr., K. Nealson, G. L. Mehall, S. H. Silverman, S. Ferry, M. Caplinger, M. Ravine (2004): The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey mission, *Space Sci. Rev.*, (110) 1–2, 85–130.
- Cook, R. A. (2005): The Mars exploration rover project, *Acta Astronautica*, (57) 2–8, 116–120.
- Cox, I. J., S. Roy, S. L. Hingorani (1995): Dynamic histogram warping of image pairs for constant image brightness, *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing*, (2), 366–369.
- Crisp, J. A., M. Adler, J. R. Matijevic, S. W. Squyres, R. E. Arvidson, D. M. Kass (2003): Mars Exploration Rover mission, *J. Geophys. Res.*, (108) E12, CiteID 8061.
- Datcu, M., G. Schwarz, K. Schmidt, C. Reck (1995): Correction of fixed pattern background and restoration of JPEG compressed CCD images, *Proc. Data Compression Conference*, JPL Publication 95-8, 115–126.
- Davies, M. E. (1973): The Mariner 9 Primary Control Net of Mars, P-5013, RAND Distribution Services, Santa Monica CA.
- Davies, M. E. & D. W. G. Arthur (1973): Martian surface coordinates, *J. Geophys. Res.*, (78), 4355–4394.
- Davies M. E. (1978): The control Net of Mars: May 1977, *J. Geophys. Res.*, (83), 2311–2312.
- Davies, M. E., F. Y. Katayama, J. A. Roth (1978): Control Net of Mars: February 1978, R-2309-NASA, RAND Distribution Services, Santa Monica CA.

- Davies M. E. & F. Y. Katayama (1983): The 1982 Control Network of Mars, *J. Geophys. Res.*, (88) 9, 7503–7504.
- Davies M. E. (1990): Geodetic Control, in: *Planetary Mapping*, R. Greeley & R. M. Batson (Hrsg.), Cambridge Planetary Science No. 6, 141–168.
- Davies M. E. (1993): The Coordinate System and Control Network of Mars, Präsentation bei der 3. HRSC/WAOSS Photogrammetry and Cartography Working Group Meeting, 12.–14. Mai 1993, Berlin.
- Dev, P. (1974): Segmentation processes in visual perception: A cooperative neural model, *Int. J. of Man-Machine Studies*, (7), 511–528.
- Dhond, U. R. & J. K. Aggarwal (1989): Structure from stereo – A review, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, (19) 6, 1489–1510.
- Didas, S., J. Weickert, B. Burgeth (2005): Stability and Local Feature Enhancement of Higher Order Nonlinear Diffusion Filtering, *Proc. DAGM 2005, LNCS 3663*, 451–458.
- Ding, L., A. Goshtasby, M. Satter (2001): Volume image registration by template matching, *Image and Vision Computing*, (19) 12, 821–832.
- Dorrer, E., H. Mayer, Y. Haase, A. Ostrovskiy, J. Rentner, M. Rentsch, S. Reznik, G. Neukum, HRSC Co-Investigator Team (2005): Verbesserung Räumlicher Daten durch „Shape from Shading“, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5/2005, 403–408.
- Dreschler, L. (1981): Ermittlung markanter Punkte auf den Bildern bewegter Objekte und Berechnung einer 3D-Beschreibung auf dieser Grundlage, Dissertation, Universität Hamburg, Fachbereich Informatik.
- Dufournaud, Y., C. Schmid, R. Horaud (2000): Matching images with different resolutions, *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, (1), 612–618.
- Dufournaud, Y., C. Schmid, R. Horaud (2004): Image matching with scale adjustment, *Computer Vision and Image Understanding*, (93) 2, 175–194.
- Duxbury, T. C., R. L. Kirk, B. A. Archinal, G. A. Neumann (2002): Mars Geodesy/Cartography Working Group, Recommendations on Mars Cartographic Constants and Coordinate Systems, *IntArchPhRS*, (34) 4, 743–746.
- Ebner, H. (1969): Genauigkeitsuntersuchung zur photogrammetrischen Sternkoordinatenbestimmung durch geschlossene Blockausgleichung, Dissertation, DGK-C 141, München.
- Ebner, H., D. Fritsch, W. Gillessen, C. Heipke (1987): Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie, *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen*, (55) 5, 194–203.
- Ebner, H., W. Kornus, T. Ohlhof (1994): A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model, *Geo-Informationssysteme*, (7) 1, 11–16.
- Egnal, G. (2000): Mutual information as a stereo correspondence measure, Technical Report MS-CIS-00-20, University of Pennsylvania.
- Egnal, G. & R. P. Wildes (2002): Detecting binocular half-occlusions: empirical comparisons of five approaches, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (24) 8, 1127–1133.
- Feldman, W. C., W. V. Boynton, R. L. Tokar, T. H. Prettyman, O. Gasnault, S. W. Squyres, R. C. Elphic, D. J. Lawrence, S. L. Lawson, S. Maurice, G. W. McKinney, K. R. Moore, R. C. Reedy (2002): Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey, *Science*, (297) 5578, 75–78.
- Felzenszwalb, P. F. & D. P. Huttenlocher (2006): Efficient Belief Propagation for Early Vision, *Int. J. of Computer Vision*, (70) 1, 41–54.
- Fischler, M. A. & R. C. Bolles (1981): Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, (24) 6, 381–395.
- Fonseca, L. M. G. & B. S. Manjunath (1996): Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery, *PE&RS*, (62) 9, 1049–1056.
- Formisano, V., D. Grassi, R. Orfei, D. Biondi, E. Mencarelli, A. Mattana, F. Nespoli, A. Maturilli, M. Giuranna, M. Rossi, M. Maggi, P. Baldetti, G. Chionchio, B. Saggin, F. Angrilli, G. Bianchini, G. Piccioni, A. Di Lellis, P. Cerroni, F. Capaccioni, M. T. Capria, A. Coradini, S. Fonti, V. Orofino, A. Blanco, L. Colangeli, E. Palomba, F. Esposito, D. Patsaev, V. Moroz, L. Zasova, N. Ignatiev, I. Khatuntsev, B. Moshkin, A. Ekonomov, A. Grigoriev, V. Nechaev, A. Kiselev, Y. Nikolsky, V. Gnedykh, D. Titov, P. Orleanski, M. Rataj, M. Malgoska, A. Jurewicz, M. I. Blecka, H. Hirsh, G. Arnold, E. Lellouch, A. Marten, T. Encrenaz, J. Lopez Moreno, S. Atreya, P. Gobbi (2004a): The Planetary Fourier Spectrometer (PFS) for Mars Express, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific

- coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 71–94.
- Formisano, V., S. Atreya, T. Encrenaz, N. Ignatiev, M. Giuranna (2004b): Detection of Methane in the Atmosphere of Mars, *Science*, (306) 5702, 1758–1761.
- Formisano, V., F. Angrilli, G. Arnold, S. Atreya, G. Bianchini, D. Biondi, A. Blanco, M. I. Blecka, A. Coradini, L. Colangeli, A. Ekonomov, F. Esposito, S. Fonti, M. Giuranna, D. Grassi, V. Gnedykh, A. Grigoriev, G. Hansen, H. Hirsh, I. Khatuntsev, A. Kiselev, N. Ignatiev, A. Jurewicz, E. Lellouch, J. Lopez Moreno, A. Marten, A. Mattana, A. Maturilli, E. Mencarelli, M. Michalska, V. Moroz, B. Moshkin, F. Nespoli, Y. Nikolsky, R. Orfei, P. Orleanski, V. Orofino, E. Palomba, D. Patsaev, G. Piccioni, M. Rataj, R. Rodrigo, J. Rodriguez, M. Rossi, B. Saggin, D. Titov, L. Zasova (2005): The Planetary Fourier Spectrometer (PFS) onboard the European Mars Express mission, *Planetary and Space Science*, (53) 10, 963–974.
- Förstner, W. (1982): On the geometric precision of digital correlation, *IntArchPhRS*, (24) 3, 176–189.
- Förstner, W. (1984): Quality assessment of object location and point transfer using digital image correlation techniques, *IntArchPhRS*, (25) A3a, 197–219.
- Förstner, W. (1986): A feature based correspondence algorithm for image matching, *IntArchPhRS* (26) 3/3, 150–166.
- Förstner, W. & E. Gülch (1987): A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features, *Proc. ISPRS Intercommission Conf. on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, 281–305.
- Fua, P. (1991): Combining stereo and monocular information to compute dense depth maps that preserve depth discontinuities, *Proc. of the 12th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, 1292–1298.
- Fua, P. (1993): A parallel stereo algorithm that produces dense depth maps and preserves image features, *Machine Vision and Applications*, (6) 1, 35–49.
- Fusiello, A., V. Roberto, E. Trucco (1997): Efficient stereo with multiple windowing, *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 858–863.
- Galeev, A. A. (1996): Russian program of planetary missions, *Acta Astronautica*, (39) 1–4, 9–14.
- Geman, S. & D. Geman (1984): Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (6), 721–741.
- Ghaffary, B. K. & A. A. Sawchuk (1983): A survey of new techniques for image registration and mapping, *Proc. of the SPIE: Applications of Digital Image Processing*, (432), 222–239.
- Gibbs, J. W. (1898): Fourier's Series, *Nature*, (59) 1522, 200.
- Gibbs, J. W. (1899): Fourier's Series, *Nature*, (59) 1539, 606.
- Golombek, M. P., R. A. Cook, T. Economou, W. M. Folkner, A. F. C. Haldemann, P. H. Kallemeyn, J. M. Knudsen, R. M. Manning, H. J. Moore, T. J. Parker, R. Rieder, J. T. Schofield, P. H. Smith, R. M. Vaughan (1997): Overview of the Mars Pathfinder Mission and Assessment of Landing Site Predictions, *Science*, (278) 5344, 1743–1748.
- Graf, J. E., R. W. Zurek, H. J. Eisen, B. Jai, M. D. Johnston, R. DePaula (2005): The Mars Reconnaissance Orbiter Mission, *Acta Astronautica*, (57) 2–8, 566–578.
- Greig, D. M., B. T. Porteous, A. H. Seheult (1989): Exact Maximum A Posteriori Estimation for Binary Images, *J. of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, (51) 2, 271–279.
- Grün, A. (1985): Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique, *South African J. of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14 (3), 175–187.
- Grün, A. & E. P. Baltsavias (1988): Geometrically Constrained Multiphoto Matching, *PE&RS*, (54) 3, 317–323.
- Gülch, E. (1991): Results of Test on Image Matching of ISPRS WG III/4, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, (46) 1, 1–18.
- Gupta, R. & R. I. Hartley (1997): Linear pushbroom cameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (19) 9, 963–975.
- Gurnett, D. A., D. L. Kirchner, R. L. Huff, D. D. Morgan, A. M. Persoon, T. F. Averkamp, F. Duru, E. Nielsen, A. Safaeinili, J. J. Plaut, G. Picardi (2005): Radar Soundings of the Ionosphere of Mars, *Science*, (310) 5756, 1929–1933.

- Gwinner, K., F. Scholten, B. Giese, J. Oberst, R. Jaumann, M. Spiegel, R. Schmidt, G. Neukum (2005): Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5/2005, 387–394.
- Hall, A. (1878): The Discovery of the Satellites of Mars, *Monthly Notices of the Astronomical Society*, 38, 205–209.
- Hampel, F. R. (1974): The Influence Curve and its Role in Robust Estimation, *J. of the American Statistical Association*, (69) 364, 383–393.
- Hampel, F. R., E. M. Ronchetti, P. J. Rousseeuw, W. A. Stahel (1986): *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*, Wiley, New York.
- Hannah, M. J. (1989): A System for Digital Stereo Image Matching, *PE&RS*, (55) 12, 1765–1770.
- Harris, C. & M. Stephens (1988): A combined corner and edge detector, *Alvey Vision Conference*, 147–151.
- Hartmann, W. K., O. Raper (1974): *The new Mars: The discoveries of Mariner 9*, NASA SP-337, Wash. D.C.
- Hechler, M. & A. Yáñez (2000): Mars Express – Consolidated Report on Mission Analysis Issue 2.0, Technical Report MEX-ESC-RP-5500, ESA.
- Hechler, M., Y. Langevin, A. Yáñez (2005): Mars Express orbit design evolution, *Dynamical Systems*, (20) 1, 175–188.
- Heipke, C. (1990): *Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*, Dissertation, DGK-C 366, München.
- Heipke, C. (1995): *Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen*, Habilitation, DGK-C 450, München.
- Heipke, C. & K. Eder (1998): Performance of tie-point extraction in automatic aerial triangulation, *OEEPE Official Publication*, (35), 125–185.
- Heipke, C. & S. Hinz (1998): Automatic Relative Orientation of Planetary Imagery Using Relational Matching, *Festschrift Gottfried Konecny, Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Uni. Hannover*, (227), 137–145.
- Heipke, C., K. Jacobsen, H. Wegmann (2002): *Integrated Sensor Orientation – Test Report and Workshop Proceedings*, OEEPE Official Publication, (43).
- Heipke, C., R. Schmidt, R. Brand, J. Oberst, G. Neukum, and the HRSC Co-Investigator Team (2004): Performance of automatic tie point extraction using HRSC imagery of the Mars Express mission, *IntArchPhRS*, (35) B4, 846–851.
- Heipke, C., J. Oberst, J. Albertz, M. Attwenger, P. Dorninger, E. Dorrer, M. Ewe, S. Gehrke, K. Gwinner, H. Hirschmüller, J. R. Kim, R. L. Kirk, H. Mayer, J.-P. Muller, R. Rengarajan, M. Rentsch, R. Schmidt, F. Scholten, J. Shan, M. Spiegel, M. Wählisch, G. Neukum, HRSC Co-Investigator Team (2007): Evaluating planetary digital terrain models – The HRSC DTM test, *Planetary and Space Science*, (55) 14, 2173–2191.
- Helava, U. V. (1976): Digital correlation in photogrammetric instruments. *IntArchPhRS*, (21) 2.
- Helava, U. V. (1988): Object-space least-squares correlation, *PE&RS*, (54) 6, 711–714.
- Hill, D. L. G., P. G. Batchelor, M. Holden, D. J. Hawkes (2001): Medical image registration, *Physics in Medicine and Biology*, (46) 1, 1–45.
- Hinson, D. P., R. A. Simpson, J. D. Twicken, G. L. Tyler, F. M. Flasar (1999): Initial results from radio occultation measurements with Mars Global Surveyor, *J. Geophys. Res.*, (104) E11, 26997–27012.
- Hirschmüller, H., P. R. Innocent, J. Garibaldi (2002): Real-Time Correlation-Based Stereo Vision with Reduced Border Errors, *Int. J. of Computer Vision*, (47) 1, 229–246.
- Hirschmüller, H. (2005): Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition 2005*, (2), 807–814.
- Hirschmüller, H., F. Scholten, G. Hirzinger (2005): Stereo Vision Based Reconstruction of Huge Urban Areas from an Airborne Pushbroom Camera (HRSC), *LNCS: Pattern Recognition, Proc. of the 27th DAGM Symposium*, 30 August - 2 September 2005, Vienna, Austria, (3663), 58–66.
- Hirschmüller, H., H. Mayer, G. Neukum, HRSC Co-Investigator Team (2006): Stereo processing of HRSC Mars Express images by semi-global matching, *IntArchPhRS*, (36) 4.
- Hirschmüller, H. & D. Scharstein (2007): Evaluation of Cost Functions for Stereo Matching, *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1–8.
- Hirschmüller, H. (2008): Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (30) 2, 328–341.

- Hofmann, O. (1982): Digitale Aufnahmetechnik, Bildmessung und Luftbildwesen, (50), 16–32.
- Huttenlocher, D. P., G. A. Klanderman, W. J. Rucklidge (1993): Comparing images using the Hausdorff distance, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (15) 9, 850–863.
- Jaumann, R., G. Neukum, T. Behnke, T. C. Duxbury, K. Eichertopf, J. Flohrer, S. v. Gasselt, B. Giese, K. Gwinner, E. Hauber, H. Hoffmann, A. Hoffmeister, U. Köhler, K.-D. Matz, T. B. McCord, V. Mertens, J. Oberst, R. Pischel, D. Reiss, E. Ress, T. Roatsch, P. Saiger, F. Scholten, G. Schwarz, K. Stephan, M. Wählisch, HRSC Co-Investigator Team (2007): The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission, Planetary and Space Science, (55) 7–8, 928–952.
- Jones, D. & J. Malik (1992): A Computational Framework for Determining Stereo Correspondence From a Set of Linear Spatial Filters, Second European Conf. Computer Vision, 395–410.
- Kanade, T. & M. Okutomi (1994): A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (16) 9, 920–932.
- Kass, M. (1983): Computing visual correspondence, Proc. DARPA Image Understanding Workshop, 54–60.
- Ke, Y. & R. Sukthankar (2004): PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, (2), 506–513.
- Keating, G. M., S. W. Bougher, R. W. Zurek, R. H. Tolson, G. J. Cancro, S. N. Noll, J. S. Parker, T. J. Schellenberg, R. W. Shane, B. L. Wilkerson, J. R. Murphy, J. L. Hollingsworth, R. M. Haberle, M. Joshi, J. C. Pearl, B. J. Conrath, M. D. Smith, R. T. Clancy, R. C. Blanchard, R. G. Wilmoth, D. F. Rault, T. Z. Martin, D. T. Lyons, P. B. Esposito, M. D. Johnston, C. W. Whetzel, C. G. Justus, J. M. Babicke (1998): The structure of the upper atmosphere of Mars: In situ accelerometer measurements from Mars Global Surveyor, Science, (279) 5357, 1672–1676.
- Kieffer, H. H. (1979): Mars Volatiles (and Meteorology and Dust), J. Geophys. Res., (84) B6, 2793–3096.
- Kiefner, M. (2001): Einfluss von Bildkompressionsverfahren auf die Qualität der digitalen Punktübertragung, Dissertation, DGK-C 531, München.
- Kingslake, R. (1978): Lens Design Fundamentals, Academic Press, San Diego, ISBN 0-12-408650-0.
- Kirk, R. L., J. Barrett, E. Howington-Kraus (1999): A database of Viking Orbiter image coverage for cartographic and scientific use, Lunar Planet. Sci. XXX, Abstract #1857, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Kirk, R. L., B. A. Archinal, E. M. Lee, M. E. Davies, T. R. Colvin, T. C. Duxbury (2001): Global Digital Image Mosaics of Mars: Assessment of Geodetic Accuracy, Lunar Planet. Sci. XXXII, Abstract #1856, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Kirk, R. L., E. Howington-Kraus, B. Redding, D. Galuszka, T. M. Hare, B. Archinal, L. A. Soderblom, J. M. Barrett (2003): High-resolution topomapping of candidate MER landing sites with Mars Orbiter Camera narrow-angle images, J. Geophys. Res., (108) E12, CiteID 8088.
- Klaus, A., M. Sormann, K. Karner (2006): Segment-Based Stereo Matching Using Belief Propagation and a Self-Adapting Dissimilarity Measure, Proc. of the 18th Int. Conf. on Pattern Recognition, (3), 15–18.
- Klein, H. P., N. H. Horowitz, G. V. Levin, V. I. Oyama, J. Lederberg, A. Rich, J. S. Hubbard, G. L. Hobby, P. A. Straat, B. J. Berdahl, G. C. Carle, F. S. Brown, R. D. Johnson (1976): The Viking Biological Investigation: Preliminary Results, Science, (194) 4260, 99–105.
- Koenderink, J. J. (1984): The structure of images, Biological Cybernetics, (50) 3, 363–370.
- Kolmogorov, V. & R. Zabih (2001): Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts, Proc. Int. Conf. on Computer Vision, 508–515.
- Konecny, G. & D. Pape (1981): Correlation Techniques and Devices, PE&RS, (47) 3, 323–333.
- Kreslavsky, M. A. & J. W. Head (2000): Kilometer-scale roughness of Mars: Results from MOLA data analysis, J. Geophys. Res., (105) E11, 26695–26711.
- Krupnik, A. (1994): Multiple-Patch Matching in the Object Space for Aerotriangulation, Dissertation, Report No. 428, Dept. of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Krupnik, A. (1996): Using Theoretical Intensity Values as Unknowns in Multiple-Patch Least-Squares Matching, PE&RS, (62) 10, 1151–1155.
- Krupnik, A. & T. Schenk (1997): Experiments with matching in the object space for aerotriangulation, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (52) 4, 160–168.

- Läbe, T. & W. Förstner (2005): Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder, Proceedings of DGPF Conference, Rostock, Germany, 21-23 September.
- Läbe, T. & W. Förstner (2006): Automatic Relative Orientation of Images, Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days, March 29th-31st, 2006, Berlin, ISBN 3-9809030-4-4.
- Lanzl, F. (1986): The Monocular Electro-Optical Stereo Scanner (MEOSS) satellite experiment, *IntArchPhRS*, (26) 1, 617–620.
- Le Moigne, J., W. Xia, P. Chalermwat, T. El-Ghazawi, M. Mareboyana, N. Netanyahu, J. C. Tilton, W. J. Campbell, R. P. Cromp (1998): First evaluation of automatic image registration methods, Proc. of Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'98, (1), 315–317.
- Leclerc, Y. G. (1989): Constructing Simple Stable Descriptions for Image Partitioning, *Int. J. Computer Vision*, (3) 1, 73–102.
- Lemmens, M. (1988): A survey on stereo matching techniques, *IntArchPhRS*, (27) 5, 11–23.
- Lemoine, F G, D. D. Rowlands, D. E. Smith, D. S. Chinn, D. E. Pavlis, S. B. Luthcke, G. A. Neumann, M. T. Zuber (1999): Orbit determination for Mars Global Surveyor during mapping, *Astrodynamicity 1999*, Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamicity Conference, Girdwood AK, 16.–19. Aug. 1999, 435–451.
- Lester, H., S. R. Arridge (1999): A survey of hierarchical non-linear medical image registration, *Pattern Recognition*, (32) 1, 129–149.
- Levin, G. V. & P. A. Straat (1976): Viking Labeled Release Biology Experiment: Interim Results, *Science*, (194) 4271, 1322–1329.
- Levin, G. V. & P. A. Straat (1977): Life on Mars? The Viking Labeled Release Experiment, *Biosystems*, (9), 165–174.
- Levinthal, E. C., W. B. Green, J. A. Cutts, E. D. Jahelka, R. A. Johansen, M. J. Sander, J. B. Seidman (1973): Mariner 9 – Image Processing and Products, *Icarus*, (18) 1, 75–101.
- Li, M. X. (1989): Hierarchical Multi-Point Matching with simultaneous Detection and Location of Breaklines, Dissertation, Royal Institute of Technology, Department of Photogrammetry, Stockholm.
- Lindeberg, T. (1994): Scale-space theory: a basic tool for analyzing structures at different scales, *J. of Applied Statistics*, (21) 1, 225–270.
- Little, J. J. (1992): Accurate Early Detection of Discontinuities, *Proc. Vision Interface*, 97–102.
- Lockwood, M. K. (2006): Introduction: Mars Science Laboratory: The Next Generation of Mars Landers, *J. of Spacecraft and Rockets*, (43) 2, 257.
- Lohse, V., C. Heipke, R. L. Kirk (2006): Derivation of planetary topography using multi-image shape-from-shading, *Planetary and Space Science*, (54) 7, 661–674.
- Lowe, D. G. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. J. of Computer Vision*, (60) 2, 91–110.
- Lü, Y. (1988): Interest-operator and fast implementation, *IntArchPhRS*, (27) 3, 491–500.
- Luhmann, T. & G. Altrogge (1986): Interest Operators for Image Matching, *IntArchPhRS*, (26) 3/2, 459–474.
- Lundin, R., S. Barabash, H. Andersson, M. Holmström, A. Grigoriev, M. Yamauchi, J.-A. Sauvaud, A. Fedorov, E. Budnik, J.-J. Thocaven, D. Winningham, R. Frahm, J. Scherrer, J. Sharber, K. Asamura, H. Hayakawa, A. Coates, D. R. Linder, C. Curtis, K. C. Hsieh, B. R. Sandel, M. Grande, M. Carter, D. H. Reading, H. Koskinen, E. Kallio, P. Riihela, W. Schmidt, T. Säles, J. Kozyra, N. Krupp, J. Woch, J. Luhmann, S. McKenna-Lawler, R. Cerulli-Irelli, S. Orsini, M. Maggi, A. Mura, A. Milillo, E. Roelof, D. Williams, S. Livi, P. Brandt, P. Wurz, P. Bochsler (2004): Solar Wind-Induced Atmospheric Erosion at Mars: First Results from ASPERA-3 on Mars Express, *Science*, (305) 5692, 1933–1936.
- Maes, F., A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal, P. Suetens (1997): Multimodality image registration by maximization of mutual information, *IEEE Trans. on Medical Imaging*, (16) 2, 187–198.
- Mahalanobis, P. C. (1936): On the generalised distance in statistics, *Proc. of the National Institute of Science of India*, (12), 49–55.
- Maintz, J. B. A. & M. A. Viergever (1998): A survey of medical image registration, *Medical Image Analysis*, (2) 1, 1–36.
- Makovsky, A. (2001): Mars 2001 Odyssey Telecommunications System Operations Handbook, NASA-JPL, D-19010, Pasadena CA.

- Malin, M. C., G. E. Danielson, A. P. Ingersoll, H. Masursky, J. Veverka, M. A. Ravine, T. A. Soulanille (1992): Mars Observer camera, *J. Geophys. Res.*, (97) E5, 7699–7718.
- Malin, M. C., M. H. Carr, G. E. Danielson, M. E. Davies, W. K. Hartmann, A. P. Ingersoll, P. B. James, H. Masursky, A. S. McEwen, L. A. Soderblom, P. Thomas, J. Veverka, M. A. Caplinger, M. A. Ravine, T. A. Soulanille, J. L. Warren (1998): Early views of the martian surface from the Mars Orbiter camera of Mars Global Surveyor, *Science*, (279) 5357, 1681–1685.
- Malin, M. C. & K. S. Edgett (2001): Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera: Interplanetary cruise through primary mission, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23429–23570.
- Malin, M. C., J. F. Bell III, W. Calvin, R. T. Clancy, R. M. Haberle, P. B. James, S. W. Lee, P. C. Thomas, M. A. Caplinger (2001): The Mars Color Imager (MARCI) on the Mars Climate Orbiter, *J. Geophys. Res.*, (106) E8, 17651–17672.
- Malin, M. C. & K. S. Edgett (2005): MGS MOC: First Views of Mars at Sub-Meter Resolution from Orbit, *Lunar Planet. Sci. XXXVI*, Abstract #1172, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Malin, M. C., J. F. Bell III, B. A. Cantor, M. A. Caplinger, W. M. Calvin, R. T. Clancy, K. C. Edgett, L. Edwards, R. M. Haberle, P. B. James, S. W. Lee, M. A. Ravine, P. C. Thomas, M. J. Wolff (2007): Context Camera Investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter, *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S04.
- Marov, M. Ya., V. S. Avduevsky, E. L. Akim, T. M. Eneev, R. S. Kremnev, S. D. Kulikov, K. M. Pichkhadze, G. A. Popov, G. N. Rogovsky (2004): Phobos-Grunt: Russian sample return mission, *Adv. Space Res.*, (33) 12, 2276–2280.
- Marr, D. & T. Poggio (1976): Cooperative computation of stereo disparity, *Science*, (194) 4262, 283–287.
- Marr, D. & T. Poggio (1979): A Computational Theory of Human Stereo Vision, *Proc. of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, (204) 1156, 301–328.
- Marr, D. & E. Hildreth (1980): Theory of Edge Detection, *Proc. of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, (207) 1167, 187–217.
- Marroquin, J. L. (1983): Design of cooperative networks, Working Paper 253, AI Lab, MIT, Cambridge MA.
- McCleese, D. J., R. D. Haskins, J. T. Schofield, R. W. Zurek, C. B. Leovy, D. A. Paige, F. W. Taylor (1992): Atmosphere and climate studies of Mars using the Mars Observer pressure modulator infrared radiometer, *J. Geophys. Res.*, (97) E5, 7735–7757.
- McCleese, D. J., J. T. Schofield, F. W. Taylor, S. B. Calcutt, M. C. Foote, D. M. Kass, C. B. Leovy, D. A. Paige, P. L. Read, R. W. Zurek (2007): Mars Climate Sounder: An investigation of thermal and water vapor structure, dust and condensate distributions in the atmosphere, and energy balance of the polar regions, *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S06.
- McCord, T. B., J. B. Adams, G. Bellucci, J.-P. Combe, A. R. Gillespie, G. Hansen, H. Hoffmann, R. Jaumann, G. Neukum, P. Pinet, F. Poulet, K. Stephan (2007): Mars Express High Resolution Stereo Camera spectrophotometric data: Characteristics and science analysis, *J. Geophys. Res.*, (112) E6, CiteID E06004.
- McEwen, A. S., E. M. Eliason, J. W. Bergstrom, N. T. Bridges, C. J. Hansen, W. A. Delamere, J. A. Grant, V. C. Gulick, K. E. Herkenhoff, L. Keszthelyi, R. L. Kirk, M. T. Mellon, S. W. Squyres, N. Thomas, C. M. Weitz, (2007): Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S02.
- Meer, P., D. Mintz, A. Rosenfeld, D. Y. Kim (1991): Robust regression methods for computer vision: A review, *Int. J. of Computer Vision*, (6) 1, 59–70.
- Mikolajczyk, K. & C. Schmid (2005): A performance evaluation of local descriptors, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (27) 10, 1615–1630.
- Mitchell, D. L., R. P. Lin, C. Mazelle, H. Reme, P. A. Cloutier, J. E. P. Connerney, M. H. Acuna, N. F. Ness (2001): Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS Electron Reflectometer, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23419–23427.
- Mitrofanov, I., D. Anfimov, A. Kozyrev, M. Litvak, A. Sanin, V. Tret'yakov, A. Krylov, V. Shvetsov, W. Boynton, C. Shinohara, D. Hamara, R. S. Saunders (2002): Maps of subsurface hydrogen from the High Energy Neutron Detector, *Mars Odyssey, Science*, (297) 5578, 78–81.
- Mrázek, P., Navara, M., 2003. Selection of Optimal Stopping Time for Nonlinear Diffusion Filtering, *Int. J. Computer Vision*, (52) 2/3, 189–203.

- Murchie, S., R. Arvidson, P. Bedini, K. Beisser, J.-P. Bibring, J. Bishop, J. Boldt, P. Cavender, T. Choo, R. T. Clancy, E. H. Darlington, D. Des Marais, R. Espiritu, D. Fort, R. Green, E. Guinness, J. Hayes, C. Hash, K. Heffernan, J. Hemmler, G. Heyler, D. Humm, J. Hutcheson, N. Izenberg, R. Lee, J. Lees, D. Lohr, E. Malaret, T. Martin, J. A. McGovern, P. McGuire, R. Morris, J. Mustard, S. Pelkey, E. Rhodes, M. Robinson, T. Roush, E. Schaefer, G. Seagrave, F. Seelos, P. Silverglate, S. Slavney, M. Smith, W.-J. Shyong, K. Strohbahn, H. Taylor, P. Thompson, B. Tossman, M. Wirzburger, M. Wolff (2007): Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S03.
- Moravec, H. P. (1977): Towards automatic visual obstacle avoidance, *Proc. of 5th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Cambridge, 584.
- Moravec, H. P. (1980): Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover, *Tech. Report CMU-RI-TR-80-03*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University & Dissertation AIM-340, CS-80-813, Stanford University.
- Neukum, G. (1999): The airborne HRSC-A: Performance results and application potential, in: *Photogrammetric Week 1999*, Fritsch & Spiller (Hrsg.), Heidelberg, 83–88.
- Neukum, G. & The HRSC-Team (2001): The Airborne HRSC-AX cameras: Evaluation of the Technical Concept and Presentation of Application Results after one Year of Operations, in: *Photogrammetric Week 2001*, Fritsch & Spiller (Hrsg.), Heidelberg, 117–130.
- Neukum, G., R. Jaumann, HRSC Co-Investigator and Experiment Team (2004): HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 17–35.
- Neukum, G., R. Jaumann, H. Hoffmann, E. Hauber, J. W. Head, A. T. Basilevsky, B. A. Ivanov, S. C. Werner, S. van Gasselt, J. B. Murray, T. McCord, and the HRSC Co-Investigator Team (2004): Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera, *Nature*, (432), 971–979.
- Neumann, G. A., D. D. Rowlands, F. G. Lemoine, D. E. Smith, M. T. Zuber (2001): Crossover analysis of Mars Orbiter Laser Altimeter data, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23753–23768.
- Neumann, G. A., D. E. Smith, M. T. Zuber (2003): Two Mars years of clouds detected by the Mars Orbiter Laser Altimeter, *J. Geophys. Res.*, (108) E4, CiteID 5023.
- Nishihara, H. K. & T. Poggio (1983): Stereo vision for robotics, in: *ISRR Conference*, Bretton Woods NH.
- Norville, F. R. (1992): Stereo Correlation: Window Shaping and DEM Corrections, *PE&RS*, (58) 1, 111–115.
- Nosratinia, A. (2001): Enhancement of JPEG-Compressed Images by Re-application of JPEG, *The Journal of VLSI Signal Processing*, (27) 1, 69–79.
- Oberst, J., G. Schwarz, T. Behnke, H. Hoffmann, K.-D. Matz, J. Flohrer, H. Hirsch, T. Roatsch, F. Scholten, E. Hauber, B. Brinkmann, R. Jaumann, D. Williams, R. Kirk, T. Duxbury, C. Leu, G. Neukum (2008): The imaging performance of the SRC on Mars Express, *Planetary and Space Science*, (56) 3–4, 473–491.
- Ohlhof, T. & W. Kornus (1994): Geometric Calibration of Digital Three-Line Cameras, *IntArchPhRS*, (30) 1, 71–81.
- Ohlhof, T. (1996): Local, Regional and Global Point Determination Using Three-Line Imagery and Orbital Constraints, *IntArchPhRS*, (31) 3, 597–603.
- Ohta, Y. & T. Kanade (1985): Stereo by intra-and inter-scanline search, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (7) 2, 139–154.
- Otto, G. P. & T. K. W. Chau (1989): Region-growing algorithm for matching of terrain images, *Image and Vision Computing*, (7) 2, 83–94.
- Pal, N. R. & S. K. Pal (1993): A review on image segmentation techniques, *Pattern Recognition*, (26) 9, 1277–1294.
- Parkes, S. M., M. J. A. Zemerly, J.-P. Muller (1991): Image Data Compression and its Effects on Stereo Height Extraction Processing, *Proc. IGARSS 91*, 1449–1452.
- Parzen, E. (1962): On Estimation of a Probability Density Function and Mode, *The Annals of Mathematical Statistics*, (33) 3, 1065–1076.
- Pateraki, M. & E. Baltsavias (2003): Analysis and Performance of the Adaptive Multi-Image Matching Algorithm for Airborne Digital Sensor ADS40, *Proc. ASPRS Annual Conference 2003*, Anchorage, AK, USA, 5–9 Mai.
- Pätzold, M., F. M. Neubauer, L. Carone, A. Hagermann, C. Stanzel, B. Häusler, S. Remus, J. Selle, D. Hagl, D. P. Hinson, R. A. Simpson, G. L. Tyler, S. W. Asmar, W. I. Axford, T. Hagfors, J.-P. Barriot, J.-C. Cerisier, T. Imamura, K.-I. Oyama, P. Janle, G. Kirchengast, V. Dehant (2004): MaRS: Mars Express Orbiter Radio Science, in: *Mars Express:*

- the scientific payload, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 51–69.
- Pätzold, M., S. Tellmann, B. Häusler, D. Hinson, R. Schaa, G. L. Tyler (2005): A Sporadic Third Layer in the Ionosphere of Mars, *Science*, (310) 5749, 837–839.
- Pennebaker, W. B. & J. L. Mitchell (1993): *JPEG Still Image Data Compression Standard*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Perona, P. & J. Malik (1990): Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (12) 7, 629–639.
- Picardi G., D. Biccari, R. Seu, J. Plaut, W. T. K. Johnson, R. L. Jordan, A. Safaeinili, D. A. Gurnett, R. Huff, R. Orosei, O. Bombaci, D. Calabrese, E. Zampolini (2004): MARSIS: Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 51–69.
- Picardi, G., J. J. Plaut, D. Biccari, O. Bombaci, D. Calabrese, M. Cartacci, A. Cicchetti, S. M. Clifford, P. Edenhofer, W. M. Farrell, C. Federico, A. Frigeri, D. A. Gurnett, T. Hagfors, E. Heggy, A. Herique, R. L. Huff, A. B. Ivanov, W. T. K. Johnson, R. L. Jordan, D. L. Kirchner, W. Kofman, C. J. Leuschen, E. Nielsen, R. Orosei, E. Pettinelli, R. J. Phillips, D. Plettemeier, A. Safaeinili, R. Seu, E. R. Stofan, G. Vannaroni, T. R. Watters, E. Zampolini (2005): Radar Soundings of the Subsurface of Mars, *Science*, (310) 5756, 1925–1928.
- Plaut, J. J., G. Picardi, A. Safaeinili, A. B. Ivanov, S. M. Milkovich, A. Cicchetti, W. Kofman, J. Mouginot, W. M. Farrell, R. J. Phillips, S. M. Clifford, A. Frigeri, R. Orosei, C. Federico, I. P. Williams, D. A. Gurnett, E. Nielsen, T. Hagfors, E. Heggy, E. R. Stofan, D. Plettemeier, T. R. Watters, C. J. Leuschen, P. Edenhofer (2007): Subsurface Radar Sounding of the South Polar Layered Deposits of Mars, *Science*, (316) 5821, 92–95.
- Pluim, J. P. W., J. B. A. Maintz, M. A. Viergever (2003): Mutual-information-based registration of medical images: A survey, *IEEE Trans. on Medical Imaging*, (22) 8, 986–1004.
- Pollard, S. B., J. E. Mayhew, J. P. Frisby (1985): PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit, *Perception*, (14) 4, 449–470.
- Pratt, W. K. (1974): Correlation Techniques of Image Registration, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, (10), 353–358.
- Price, K. E. (1985): Relaxation matching techniques – A comparison (for image analysis), *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (7) 5, 617–623.
- Pulido-Cobo, J. A., J. Schoenmaekers (2004): Combined Control of the Operational Mars Express Orbit and the S/C Angular Momentum, *Proc. of the 18th Int. Symposium on Space Flight Dynamics*, München, 11–15 Okt. 2004.
- Pullan, D., M. R. Sims, I. P. Wright, C. T. Pillinger, R. Trautner (2004): Beagle 2: the exobiological lander of Mars Express, in: *Mars Express: the scientific payload*, Andrew Wilson (Hrsg.), scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 165–204.
- Reeve III, H. C., J. S. Lim (1983): Reduction of blocking effect in image coding, *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, (8), 1212–1215.
- Reininger, R. & J. Gibson (1983): Distributions of the Two-Dimensional DCT Coefficients for Images, *IEEE Trans. on Communications*, (31) 6, 835–839.
- Riekher, R. (1990): *Fernrohre und ihre Meister*, 2. Auflage, Verlag Technik GmbH, Berlin, ISBN 3-341-00791-1.
- Roatsch, T. (2005): pers. Kommunikation, DLR Berlin-Adlerhof.
- Rosenholm, D. (1986): Accuracy Improvement of Digital Matching for Evaluation of Digital Terrain Models, *IntArchPhRS*, (26) 3/2, 573–587.
- Rosenholm, D. (1987): Multi-Point Matching using the Least Squares Technique for Evaluation of Three-Dimensional Models, *PE&RS*, (53) 6, 621–626.
- Rousseeuw, P. J., G. B. Bassett Jr. (1990): The Remedian: A Robust Averaging Method for Large Data Sets, *J. of the American Statistical Association*, (85) 409, 97–104.
- Roy, S. (1999): Stereo Without Epipolar Lines: A Maximum-Flow Formulation, *Int. J. of Computer Vision*, (34) 2, 147–161.

- Sagdeev, R. Z., V. M. Balebanov, A. V. Zakharov (1988): The Phobos project: Scientific objectives and experimental methods, *Soviet Science Review, Sect. E Astrophysics and Space Physics*, (6) 1, 1–60.
- Salomon, D. (2005): *Coding for data and computer communications*, Berlin-Heidelberg-London, Springer Verlag, ISBN 0-387-21245-0.
- Sandau, R. & A. Eckhardt (1996): The stereo camera family WAOSS/WAAC for spaceborne/airborne applications, *IntArchPhRS*, (31) B1, 170–175.
- Sandau, R. & R. Landrock (1998): Weitwinkel-Stereoscanner WAOSS für die Mission Mars 96. In: R. Sandau & R. Landrock, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.): *Forschungsbericht, Deutsche Hochschulschriften*, 1146, Dr. Markus Hänsel-Hohenhausen, Egelsbach, Frankfurt a. M., Washington, ISBN 3-8267-1146-7.
- Saunders, R. S., R. E. Arvidson, G. D. Badhwar, W. V. Boynton, P. R. Christensen, F. A. Cucinotta, W. C. Feldman, R. G. Gibbs, C. Kloss Jr., M. R. Landano, R. A. Mase, G. W. McSmith, M. A. Meyer, I. G. Mitrofanov, G. D. Pace, J. J. Plaut, W. P. Sidney, D. A. Spencer, T. W. Thompson, C. J. Zeitlin (2004): 2001 Mars Odyssey Mission summary, *Space Sci. Rev.*, (110) 1–2, 1–36.
- Scharstein, D. (1994): Matching images by comparing their gradient fields, *Proc. IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition*, (1), 572–575.
- Scharstein, D. & R. Szeliski (2002): A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms, *Int. J. of Computer Vision*, (47) 1, 7–42.
- Schenk, T. & A. Krupnik (1996): Ein Verfahren zur hierarchischen Mehrfachbildzuordnung im Objektraum, *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 1/1996, 2–11.
- Schmid, C. & R. Mohr (1997): Local grayvalue invariants for image retrieval, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (19) 5, 530–535.
- Schmid, C., R. Mohr, C. Bauckhage (2000): Evaluation of Interest Point Detectors, *Int. J. of Computer Vision*, (37) 2, 151–172.
- Schmidt, R. & R. Brand (2003): Automatic Determination of Tie Points for HRSC on Mars Express, *Proc. ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space*, Hannover.
- Schmidt, R., C. Heipke, R. Brand, G. Neukum, HRSC Co-Investigator Team (2005): Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5/2005, 373–379.
- Schmidt, R., C. Heipke, G. Neukum and the HRSC Co-Investigator Team (2006): Improving Tie Point Extraction by Anisotropic Diffusion, *IntArchPhRS*, (36) 4, 352–357.
- Schnitger, A. (2007): *Bildrekonstruktion mittels Anisotroper Diffusion am Beispiel HRSC auf Mars Express*, Studienarbeit, Universität Hannover (unveröffentlicht).
- Scholten, F., K. Gwinner, F. Wewel (2002): Angewandte digitale Photogrammetrie mit der HRSC, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5/2002, 317–332.
- Scholten, F., K. Gwinner, T. Roatsch, K. D. Matz, M. Wählisch, B. Giese, J. Oberst, R. Jaumann, G. Neukum (2005): Mars Express HRSC Data Processing – Methods and Operational Aspects, *PE&RS*, (71) 10, 1143–1152.
- Seidelmann, P. K., V. K. Abalakin, M. Bursa, M. E. Davies, C. De Bergh, J. H. Lieske, J. Oberst, J. L. Simon, E. M. Standish, P. Stooke, P. C. Thomas (2002): Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites: 2000, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, (82) 1, 83–111.
- Seige, P. & D. Meissner (1993): MOMS-02: An Advanced High Resolution Multispectral Stereo Scanner for Earth Observation, *Geo-Information-Systeme*, (6) 1, 4–11.
- Seu, R., R. J. Phillips, D. Biccari, R. Orosei, A. Masdea, G. Picardi, A. Safaeinili, B. A. Campbell, J. J. Plaut, L. Marinangeli, S. E. Smrekar, D. C. Nunes (2007): SHARAD sounding radar on the Mars Reconnaissance Orbiter, *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S05.
- Shan, J., J.-S. Yoon, D. S. Lee, R. L. Kirk, G. A. Neumann (2005): Photogrammetric analysis of the Mars global surveyor mapping data, *PE&RS*, (71) 1, 97–108.
- Shapiro, L. G. & R. M. Haralick (1987): Relational matching, *Applied Optics*, (26) 10, 1845–1851.
- Sheehan W. (1996): *The Planet Mars: A History of Observation and Discovery*, Tucson.

- Shen, M. Y., C. C. J. Kuo (1998): Review of postprocessing techniques for compression artifact removal, *J. of Visual Communication and Image Representation*, (9) 1, 2–14.
- Sims, M. R. (2004): *Beagle 2 – Mission Report*, University of Leicester, Leicester.
- Smith, D. E., M. T. Zuber, S. C. Solomon, R. J. Phillips, J. W. Head, J. B. Garvin, W. B. Banerdt, D. O. Muhleman, G. H. Pettengill, G. A. Neumann, F. G. Lemoine, J. B. Abshire, O. Aharonson, C. D. Brown, S. A. Hauck, A. B. Ivanov, P. J. McGovern, H. J. Zwally, T. C. Duxbury (1999): The global topography of Mars and implications for surface evolution, *Science*, (284) 5422, 1495–1503.
- Smith, D. E., W. L. Sjogren, G. L. Tyler, G. Balmino, F. G. Lemoine, A. S. Konopliv (1999): The gravity field of Mars: Results from Mars Global Surveyor, *Science*, (286) 5437, 94–97.
- Smith, D. E., M. T. Zuber, G. A. Neumann (2001a): Seasonal variations of snow depth on Mars, *Science*, (294) 5549, 2141–2146.
- Smith, D. E., M. T. Zuber, H. V. Frey, J. B. Garvin, J. W. Head, D. O. Muhleman, G. H. Pettengill, R. J. Phillips, S. C. Solomon, H. J. Zwally, W. B. Banerdt, T. C. Duxbury, M. P. Golombek, F. G. Lemoine, G. A. Neumann, D. D. Rowlands, O. Aharonson, P. G. Ford, A. B. Ivanov, C. L. Johnson, P. J. McGovern, J. B. Abshire, R. S. Afzal, X. Sun (2001b): Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23689–23722.
- Smith, P. H. (2004): The Phoenix mission to Mars, in: *Proceedings IEEE Aerospace Conference*, 6–13 März 2004, Big Sky MT, (1), 33–342.
- Snyder, C. W. (1977): The Missions of the Viking Orbiters, *J. Geophys. Res.*, (82) 28, 3971–3984.
- Snyder, C. W. (1979a): The extended mission of Viking, *J. Geophys. Res.*, (84) B14, 7917–7933.
- Snyder, C. W. (1979b): The planet Mars as seen at the end of the Viking mission, *J. Geophys. Res.*, (84) B14, 8487–8519.
- Snyder, J. P. (1987): *Map Projections – A Working Manual*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1395.
- Soffen, G. A. (1977): The Viking Project, *J. Geophys. Res.*, (82) 28, 3959–3970.
- Spiegel, M., U. Stilla, B. Giese, G. Neukum (2005): Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformation, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5/2005, 381–386.
- Spiegel, M. & G. Neukum (2007): Simultaneous Adjustment of Interior and Exterior Orientation of HRSC on Mars Express, in: *ISPRS WG IV/7, Extraterrestrial Mapping Workshop „Advances in Planetary Mapping 2007“*, Houston TX.
- Spiegel, M. (2007): *Kombinierte Ausgleichung der Mars Express HRSC Zeilenbilddaten und des Mars Global Surveyor MOLA DGM*, Dissertation, DGK-C 610, München.
- Squyres, S. W., R. E. Arvidson, E. T. Baumgartner, J. F. Bell III, P. R. Christensen, S. Gorevan, K. E. Herkenhoff, G. Klingelhöfer, M. B. Madsen, R. V. Morris, R. Rieder, R. A. Romero (2003): Athena Mars rover science investigation, *J. Geophys. Res.*, (108) E12, CiteID 8062.
- Squyres, S. W., R. E. Arvidson, J. F. Bell, III, J. Brückner, N. A. Cabrol, W. Calvin, M. H. Carr, P. R. Christensen, B. C. Clark, L. Crumpler, D. J. Des Marais, C. d’Uston, T. Economou, J. Farmer, W. Farrand, W. Folkner, M. P. Golombek, S. Gorevan, J. A. Grant, R. Greeley, J. Grotzinger, L. Haskin, K. E. Herkenhoff, S. Hviid, J. Johnson, G. Klingelhöfer, A. Knoll, G. Landis, M. Lemmon, R. Li, M. B. Madsen, M. C. Malin, S. M. McLennan, H. Y. McSween, D. W. Ming, J. Moersch, R. V. Morris, T. Parker, J. W. Rice Jr., L. Richter, R. Rieder, M. Sims, M. Smith, P. Smith, L. A. Soderblom, R. Sullivan, H. Wänke, T. Wdowiak, M. Wolff, A. Yen (2004a): The Spirit Rover’s Athena science investigation at Gusev crater, Mars, *Science*, (305) 5685, 794–799.
- Squyres, S. W., R. E. Arvidson, J. F. Bell, III, J. Brückner, N. A. Cabrol, W. Calvin, M. H. Carr, P. R. Christensen, B. C. Clark, L. Crumpler, D. J. Des Marais, C. d’Uston, T. Economou, J. Farmer, W. Farrand, W. Folkner, M. P. Golombek, S. Gorevan, J. A. Grant, R. Greeley, J. Grotzinger, L. Haskin, K. E. Herkenhoff, S. Hviid, J. Johnson, G. Klingelhöfer, A. Knoll, G. Landis, M. Lemmon, R. Li, M. B. Madsen, M. C. Malin, S. M. McLennan, H. Y. McSween, D. W. Ming, J. Moersch, R. V. Morris, T. Parker, J. W. Rice Jr., L. Richter, R. Rieder, M. Sims, M. Smith, P. Smith, L. A. Soderblom, R. Sullivan, H. Wänke, T. Wdowiak, M. Wolff, A. Yen (2004b): The Opportunity Rover’s Athena Science Investigation at Meridiani Planum, Mars, *Science*, (306) 5702, 1698–1703.
- Squyres, S. W., A. H. Knoll, R. E. Arvidson, B. C. Clark, J. P. Grotzinger, B. L. Jolliff, S. M. McLennan, N. Tosca, J. F. Bell III, W. M. Calvin, W. H. Farrand, T. D. Glotch, M. P. Golombek, K. E. Herkenhoff, J. R. Johnson, G. Klingelhöfer,

- H. Y. McSween, A. S. Yen (2006a): Two years at Meridiani Planum: Results from the Opportunity Rover, *Science*, (313) 5792, 1403–1407.
- Squyres, S. W., R. E. Arvidson, D. Bollen, J. F. Bell III, J. Brückner, N. A. Cabrol, W. M. Calvin, M. H. Carr, P. R. Christensen, B. C. Clark, L. Crumpler, D. J. Des Marais, C. d’Uston, T. Economou, J. Farmer, W. H. Farrand, W. Folkner, R. Gellert, T. D. Glotch, M. P. Golombek, S. Gorevan, J. A. Grant, R. Greeley, J. Grotzinger, K. E. Herkenhoff, S. Hviid, J. R. Johnson, G. Klingelhöfer, A. H. Knoll, G. Landis, M. Lemmon, R. Li, M. B. Madsen, M. C. Malin, S. M. McLennan, H. Y. McSween, D. W. Ming, J. Moersch, R. V. Morris, T. Parker, J. W. Rice Jr., L. Richter, R. Rieder, C. Schröder, M. Sims, M. Smith, P. Smith, L. A. Soderblom, R. Sullivan, N. J. Tosca, H. Wänke, T. Wdowiak, M. Wolff, A. Yen (2006b): Overview of the Opportunity Mars Exploration Rover Mission to Meridiani Planum: Eagle Crater to Purgatory Ripple, *J. Geophys. Res.*, (111) E12, CiteID E12S12.
- Stanzel, C., M. Pätzold, R. Greeley, E. Hauber, G. Neukum, HRSC Co-Investigator Team (2006): Dust devils on Mars observed by the High Resolution Stereo Camera, *Geophys. Res. Lett.*, 3311, 202.
- Steinbacher, R. H., N. R. Haynes (1973): Mariner 9 mission profile and project history, *Icarus*, (18) 1, 64–74.
- Steinbacher, R. H., A. Kliore, J. Lorell, H. Hipsher, C. A. Barth, H. Masursky, G. Münch, J. Pearl, B. Smith, (1972): Mariner 9 science experiments – preliminary results, *Science*, (175) 4019, 293–294.
- Sun, J., N. N. Zheng, H. Y. Shum (2003): Stereo matching using belief propagation, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (25) 7, 787–800.
- Svedhema, H., D. V. Titov, D. McCoy, J.-P. Lebreton, S. Barabash, J.-L. Bertaux, P. Drossart, V. Formisano, B. Häusler, O. Korablev, W. J. Markiewicz, D. Nevejans, M. Pätzold, G. Piccioni, T. L. Zhang, F. W. Taylor, E. Lellouch, D. Koschny, O. Witasse, H. Eggel, M. Warhaut, A. Accomazzo, J. Rodriguez-Canabal, J. Fabrega, T. Schirmann, A. Clochet, M. Coradini (2007): Venus Express – The first European mission to Venus, *Planetary and Space Science*, (55) 12, 1636–1652.
- Swift, J. (1726): *Travels into Several Remote Nations of the World in Four Parts. By Lemuel Gulliver, First a Surgeon, and then a Captain of Several Ships*, London.
- Szeliski, R., R. Zabih, D. Scharstein, O. Veksler, V. Kolmogorov, A. Agarwala, M. Tappen, C. Rother (2006): A Comparative Study of Energy Minimization Methods for Markov Random Fields, *LNCS*, (3952), 16–29.
- Szeliski, R., R. Zabih, D. Scharstein, O. Veksler, V. Kolmogorov, A. Agarwala, M. Tappen, C. Rother (2008): A Comparative Study of Energy Minimization Methods for Markov Random Fields, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (30) 6, 1068–1080.
- Terzopoulos, D. (1986): Regularization of inverse visual problems involving discontinuities, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (8) 4, 413–424.
- Tsingas, V. (1992): *Automatisierung der Punktübertragung in der Aerotriangulation durch mehrfache digitale Bildzuordnung*, Dissertation, DGK-C 392, München.
- Tsingas, V. (1994): Graph-theoretical approach for multiple-feature matching and its application for digital point transfer, *IntArchPhRS*, (30) 3/2, 865–871.
- Tyler, G. L., G. Balmino, D. P. Hinson, W. L. Sjogren, D. E. Smith, R. Woo, S. W. Asmar, M. J. Connally, C. L. Hamilton, R. A. Simpson (1992): Radio science investigations with Mars Observer, *J. Geophys. Res.*, (97) E5, 7759–7779.
- Tyler, G. L., G. Balmino, D. P. Hinson, W. L. Sjogren, D. E. Smith, R. A. Simpson, S. W. Asmar, P. Priest, J. D. Twicken (2001): Radio science observations with Mars Global Surveyor: Orbit insertion through one Mars year in mapping orbit, *J. Geophys. Res.*, (106) E10, 23327–23348.
- Uebbing, R. (1996): An Automated Digital Approach for the Generation of Digital Terrain Models Using HRSC and WAOSS Image Data of the Mars96 Mission, *IntArchPhRS*, (31) 3, 894–897.
- Van den Elsen, P. A., E. J. D. Pol, M. A. Viergever (1993): Medical image matching – a review with classification, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, (12) 1, 26–39.
- Van Der Merve, N. & H. Rüther (1996): An image matching scheme using a hybrid feature- and area based approach, *IntArchPhRS*, (31) 3, 703–709.
- Van Meerbergen, G., M. Vergauwen, M. Pollefeys, L. Van Gool (2002): A Hierarchical Symmetric Stereo Algorithm Using Dynamic Programming, *Int. J. of Computer Vision*, (47) 1, 275–285.
- Veksler, O. (1999): *Efficient Graph-based Energy Minimization Methods in Computer Vision*, Dissertation, Cornell University, Ithaca NY.

- Viola, P. & W. M. Wells III (1997): Alignment by Maximization of Mutual Information, *Int. J. of Computer Vision*, (24) 2, 137–154.
- Vosselman, G. (1992): *Relational matching*, LNCS, (628), Berlin-Heidelberg-New York, Springer, ISBN 978-3-540-55798-2.
- Wallace, G. K. (1991): The JPEG still picture compression standard, *Communications of the ACM*, (34) 4, 30–44.
- Watters, T. R., C. J. Leuschen, J. J. Plaut, G. Picardi, A. Safaeinili, S. M. Clifford, W. M. Farrell, A. B. Ivanov, R. J. Phillips, E. R. Stofan (2006): MARSIS radar sounder evidence of buried basins in the northern lowlands of Mars, *Nature*, (444) 7121, 905–908.
- Weickert, J., S. Ishikawa, A. Imiya (1999): Linear Scale-Space has First been Proposed in Japan, *J. of Mathematical Imaging and Vision*, (10) 3, 237–252.
- Weisensee, M. (1990): Fundamentals of Shape from X Techniques, *IntArchPhRS*, (28) 3, 985–999.
- Werner, H. (1984): Automatic Gross Error Detection by Robust Estimators, *IntArchPhRS*, (25) 3b, 1101–1108.
- Wewel, F. (1996): Determination of conjugate points of stereoscopic three line scanner data of Mars 96 mission, *IntArchPhRS*, (31) 3, 936–939.
- Wewel, F., F. Scholten, G. Neukum, J. Albers (1998): Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 6/1998, 337–348.
- Wiedemann, C., L. Tang, T. Ohlhof (1996): A New Matching Approach for Three-Line Scanner Imagery, *IntArchPhRS*, (31) 3, 940–945.
- Wikipedia (2007): Chronologie der Mars-Missionen, In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, Bearbeitungsstand: 16. August 2007, 22:51 UTC, http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Chronologie_der_Mars-Missionen&oldid=35637257, (Abgerufen: 28. August 2007, 13:45 UTC).
- Witkin, A. P. (1983): Scale-space filtering, *Proc. 7th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Karlsruhe, Germany, 1019–1022, 1983.
- Wrobel, B. (1987): Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen, *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen*, (55) 3, 93–101.
- Wu S. S. C. & F. J. Schafer (1984): Mars control network, *American Society of Photogrammetry, 50th Annual Meeting*, (2), 456–464.
- Wu S. S. C. & F. J. Doyle (1990): Topographic Mapping, in: *Planetary Mapping*, R. Greeley & R. M. Batson (Hrsg.), Cambridge Planetary Science No. 6, 169–207.
- Yang, Y., N. P. Galatsanos, A. K. Katsaggelos (1993): Regularized reconstruction to reduce blocking artifacts of blockdiscrete cosine transform compressed images, *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, (3) 6, 421–432.
- Yoon, J.-S. & J. Shan (2005): Combined Adjustment of MOC Stereo Imagery and MOLA Altimetry Data, *PE&RS*, (71) 10, 1179–1186.
- You, Y. L. & M. Kaveh (2000): Fourth-order partial differential equations for noise removal, *IEEE Trans. on Image Processing*, (9) 10, 1723–1730.
- Youla, D. (1978): Generalized Image Restoration by the Method of Alternating Orthogonal Projections, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, (25) 9, 694–702.
- Zabih, R. & J. Woodfill (1994): Non-parametric local transforms for computing visual correspondence, *Proc. 3rd European Conf. on Computer Vision*, (2), 151–158.
- Zakhor, A. (1992): Iterative procedures for reduction of blocking effects in transform image coding, *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, (2) 1, 91–95.
- Zeitler, W. (1999): *Simultane Neuausgleichung des globalen 3D-Mars-Netzes*, Dissertation, DGK-C 511, München.
- Zeitlin, C., T. Cleghorn, F. Cucinotta, P. Saganti, V. Andersen, K. Lee, L. Pinsky, W. Atwell, R. Turner, G. Badhwar (2004): Overview of the Martian radiation environment experiment, *Adv. Space Res.*, (33) 12, 2204–2210.
- Zhukov, B., E. Lorenz, D. Oertel, M. Wooster, G. Roberts (2006): Spaceborne detection and characterization of fires during the bi-spectral infrared detection (BIRD) experimental small satellite mission (2001–2004), *Remote Sensing of Environment*, (100) 1, 29–51.

- Zitnick, C. L. & T. Kanade (2000): A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion detection, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (22) 7, 675–684.
- Zitová, B. & J. Flusser (2003): Image registration methods: A survey, *Image and Vision Computing*, (21) 11, 977–1000.
- Zuber, M. T., F. G. Lemoine, D. E. Smith, A. S. Konopliv, S. E. Smrekar, S. W. Asmar (2007): Mars Reconnaissance Orbiter Radio Science Gravity Investigation, *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S07.
- Zurek, R. W., S. E. Smrekar (2007): An overview of the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) science mission, *J. Geophys. Res.*, (112) E5, CiteID E05S01.

Abkürzungsverzeichnis

AD	Absolute Differences
AEDR	Aggregated Experiment Data Record
ARGUS	Stereo Spectral Imaging System
ASPERA	Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms (Energetic Neutral Atoms Analyser)
BIRD	Bispectral Infra-Red Detection
BL	Blauer Kanal der HRSC
Caltech	California Institute of Technology
CCD	Charge-Coupled Device
cPROTO	compensated Pitch and Roll Targeted Observation
CRISM	Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars
CTX	Context Imager
CV	Computer Vision
DCE	Data Compression Electronics
DCT	Diskrete Kosinustransformation
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DP	Dynamic Programming
DSN	Deep Space Network
ESA	European Space Agency
ESOC	European Space Operations Centre
ESTRACK	European Space Tracking
FDT	Flight Dynamics Team
FM1	Flight Model 1
FM2	Flight Model 2
FPS	Focal Plane Subunit
GR	Grüner Kanal der HRSC
GPS	Global Positioning System
GRS	Gamma-Ray Spectrometer
GSFC	Goddard Space Flight Center
HEND	High Energy Neutron Detector
HiRISE	High Resolution Imaging Science Experiment
HRSC	High Resolution Stereo Camera
HRSC-A	High Resolution Stereo Camera-Airborne
HRSC-AX	High Resolution Stereo Camera-Airborne Extended
HRSC-AXW	High Resolution Stereo Camera-Airborne Extended Wideangle
IAG	International Association of Geodesy
IAU	International Astronomical Union

IDCT	Inverse Diskrete Kosinustransformation
IKF	Institut für Kosmosforschung
INS	Inertiales Navigationssystem
IR	Infrarot bzw. Infraroter Kanal der HRSC
JPEG	Joint Photographic Experts Group
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KK	Kreuzkorrelation
LSM	Least Squares Matching
MAD	Median Absolute Deviation
MAG/ER	Magnetometer/Electron Reflectometer
MARCI	Mars Color Imager
MARIE	Mars Radiation Environment Experiment
MaRS	Mars Radio Science Experiment
MARSIS	Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (Sub-Surface Sounding Radar Altimeter)
MCS	Mars Climate Sounder
MDIM	Mars Digital Image Model
MEGDR	MOLA Experiment Gridded Data Record
MEOSS	Monocular Electro-Optical Stereo Scanner
MER	Mars Exploration Rover
MEX	Mars Express
MGS	Mars Global Surveyor
MI	Mutual Information
MO	Mars Observer
MOC	Mars Orbiter Camera
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter
MOMS	Modular Optoelectronic Multispectral Scanner
MPF	Makropixelformat
MRF	Markov Random Field
MRO	Mars Reconnaissance Orbiter
MSE	Mean Square Error
MSL	Mars Science Laboratory
MSTO	Mars Science and Telecommunications Orbiter
NA	Narrow Angle
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCC	Normalized Cross-Correlation Coefficient
ND	Nadir
NIR	Nahes Infrarot
NL	Non-Local bzw. Number of Lines

NS	Neutron Spectrometer bzw. Number of Samples
OMEGA	Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité (Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer)
P1	Photometriekanal 1 der HRSC
P2	Photometriekanal 2 der HRSC
PEDR	Precision Experiment Data Record
PFS	Planetary Fourier Spectrometer
PMIRR	Pressure Modulated Infrared Radiometer
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
RAND	Research And Development Corporation
RANSAC	Random Sample Consensus
RE	Roter Kanal der HRSC
RS	Radio Science
S1	Stereokanal 1 der HRSC
S2	Stereokanal 2 der HRSC
SAD	Sum of Absolute Differences
SD	Squared Differences
SHARAD	Shallow Radar
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPICAM	Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars (Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer)
SPICE	Spacecraft ephemeris, Planet, satellite, comet, or asteroid ephemerides, Instrument description kernel, Pointing kernel (C-matrix), Events kernel
SRC	Super Resolution Channel
SSD	Sum of Squared Differences
TES	Thermal Emission Spectrometer
THEMIS	Thermal Emission Imaging System
TIU	Time Interval Unit
TV	Total Variation
USGS	United States Geological Survey
VICAR	Video Image Communication and Retrieval
VIS	Visual Imaging Subsystem bzw. Visible
WA	Wide Angle
WAAC	Wide Angle Airborne Camera
WAOSS	Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner

Anhang A: Ergebnisse Blockartefakte



Rekonstruierte Version aus 16 Verschiebungen (Q_1 Matrix)



Rekonstruierte Version aus 4 Verschiebungen (Q_1 Matrix)



Mit Q_2 komprimierte Version



Rekonstruierte Version aus 64 Verschiebungen (Q_2 Matrix)



Rekonstruierte Version aus 16 Verschiebungen (Q_2 Matrix)



Rekonstruierte Version aus 4 Verschiebungen (Q_2 Matrix)



Mit Q_3 komprimierte Version



Rekonstruierte Version aus 64 Verschiebungen (Q_3 Matrix)

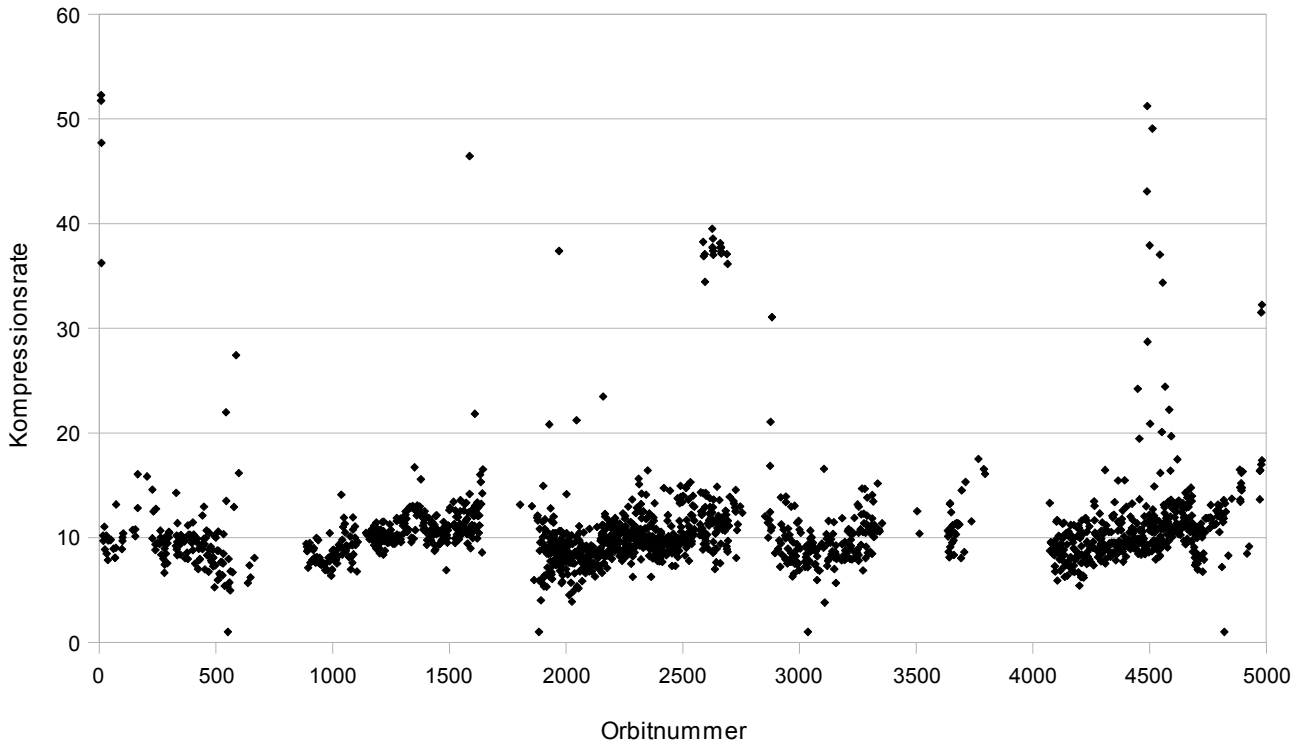


Rekonstruierte Version aus 16 Verschiebungen (Q_3 Matrix)

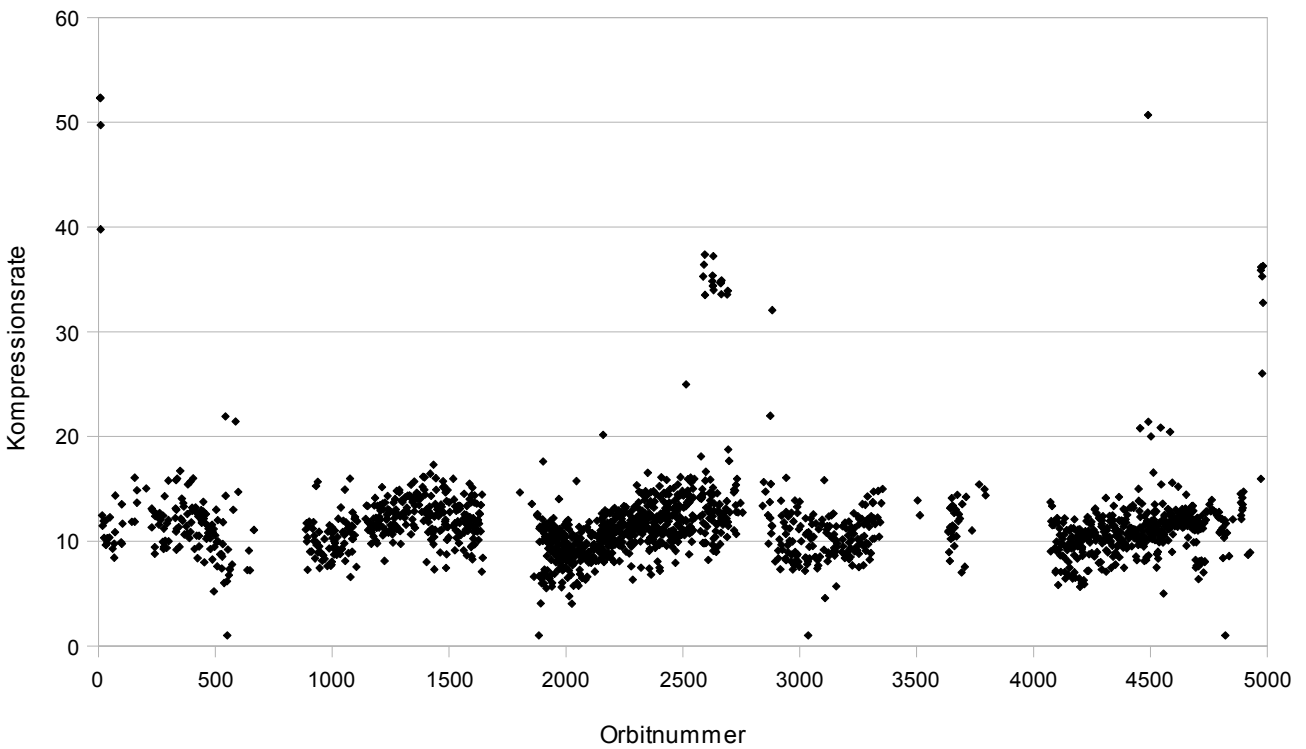


Rekonstruierte Version aus 4 Verschiebungen (Q_3 Matrix)

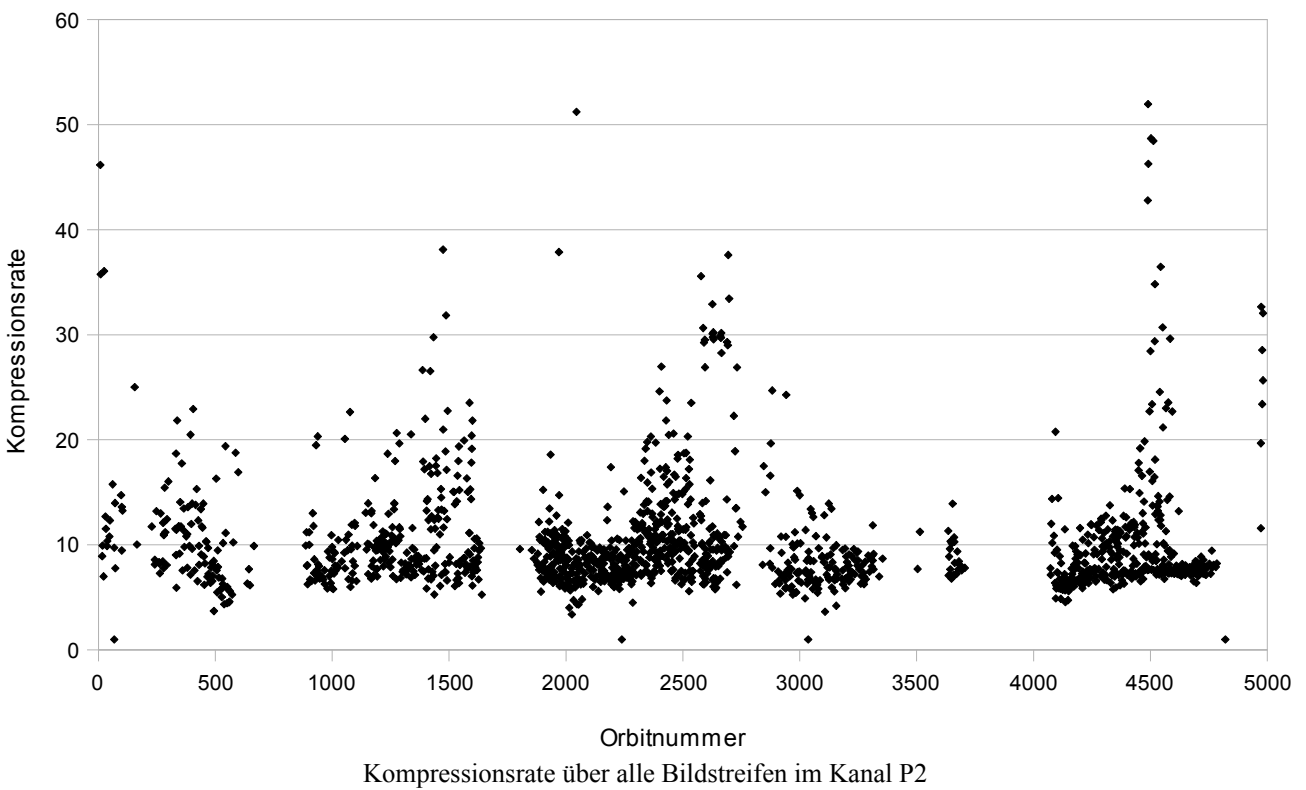
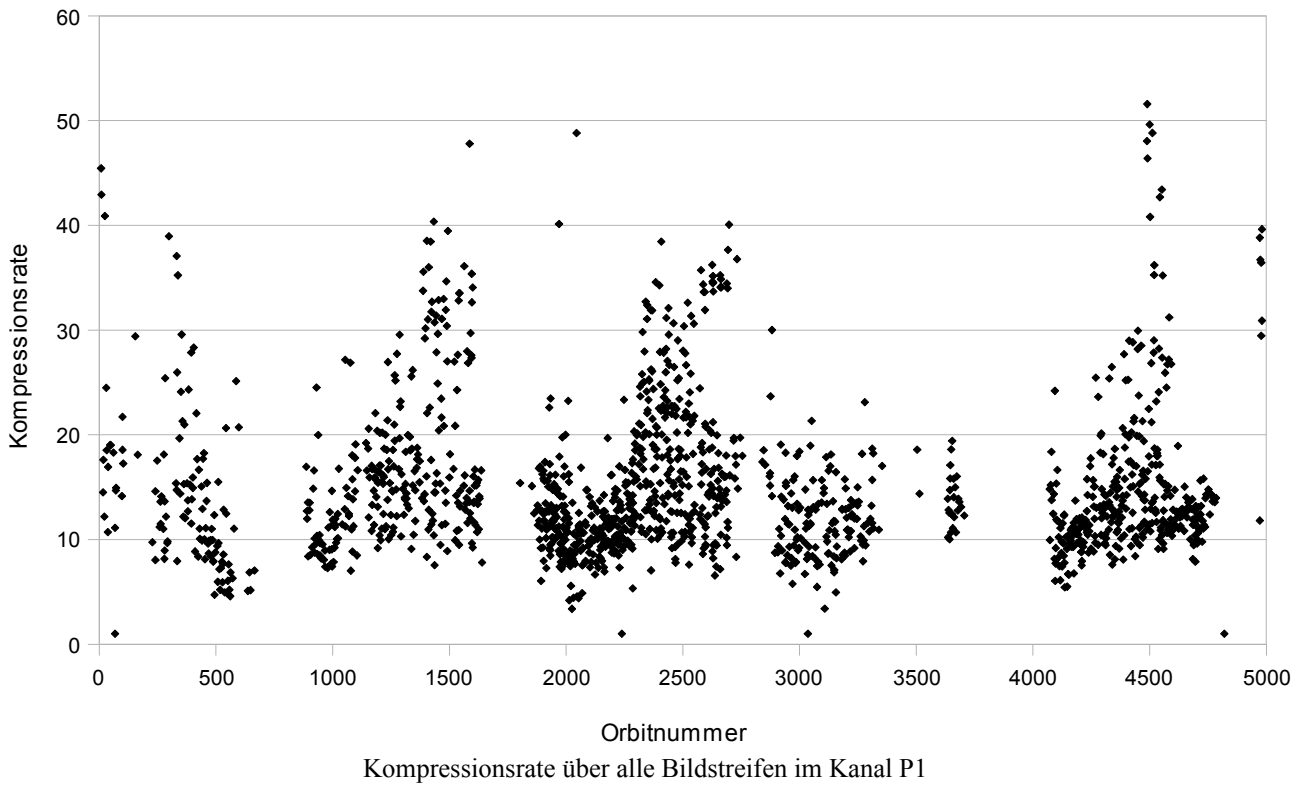
Anhang B: Kompressionsraten

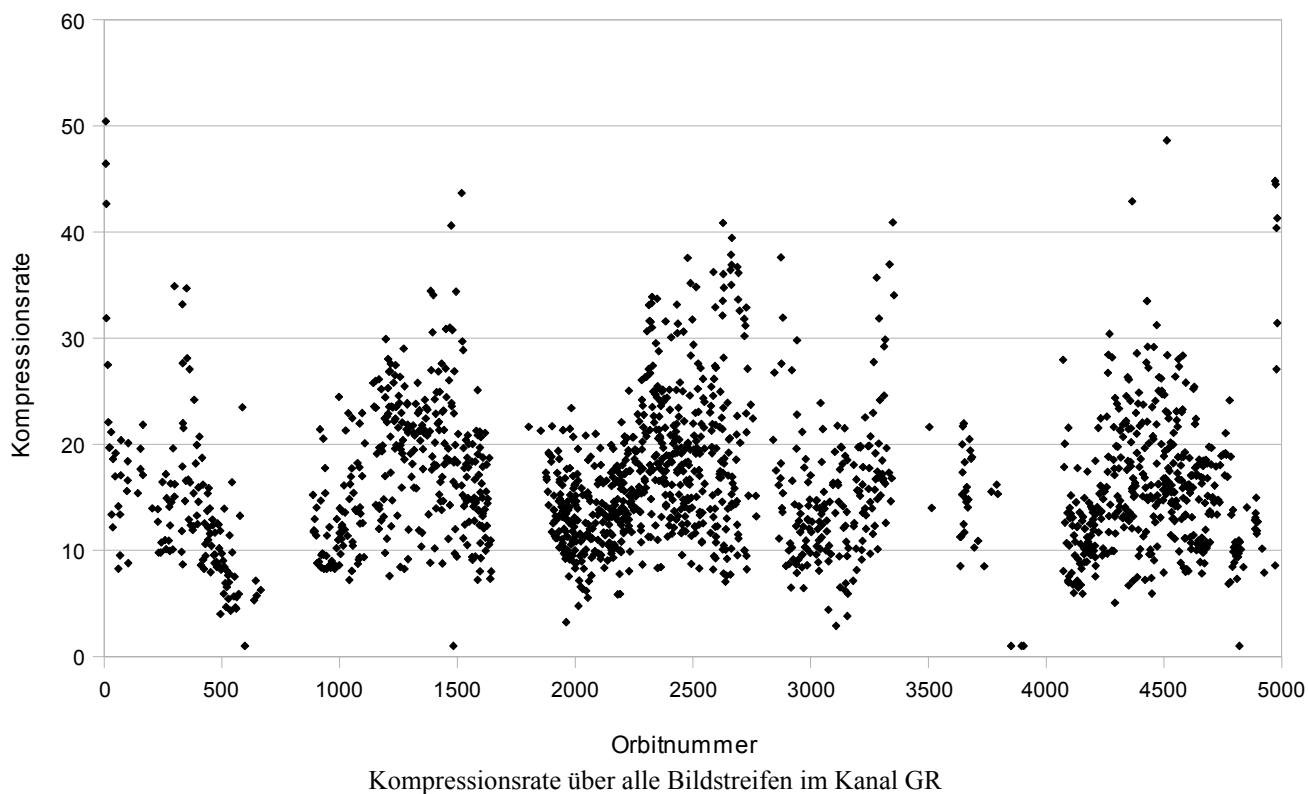
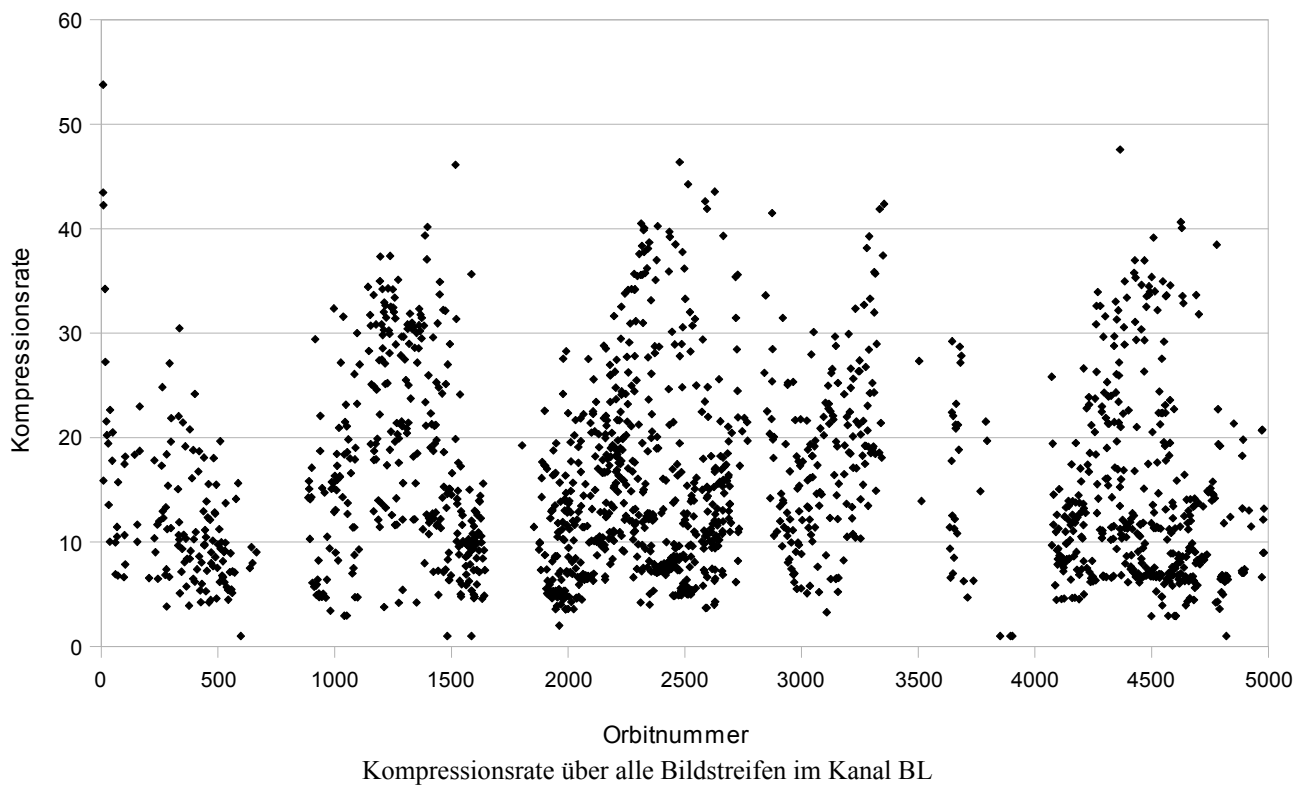


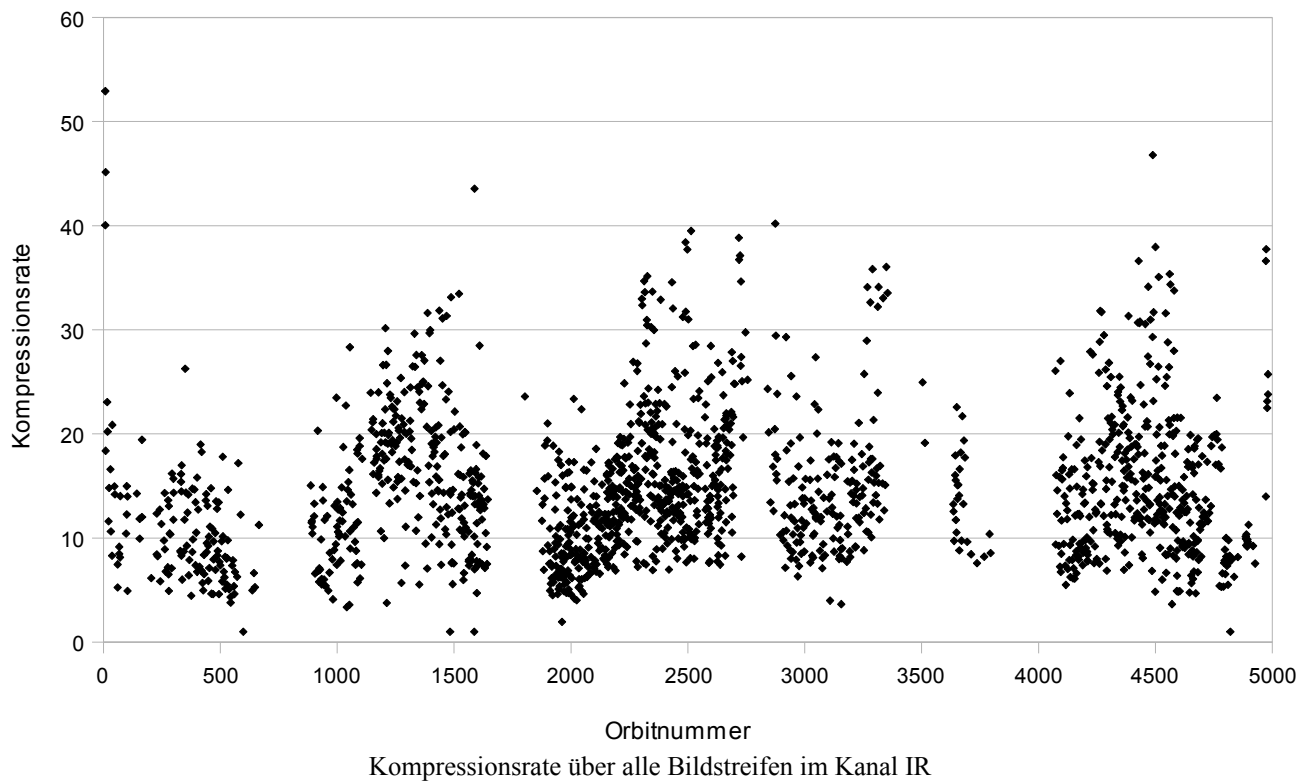
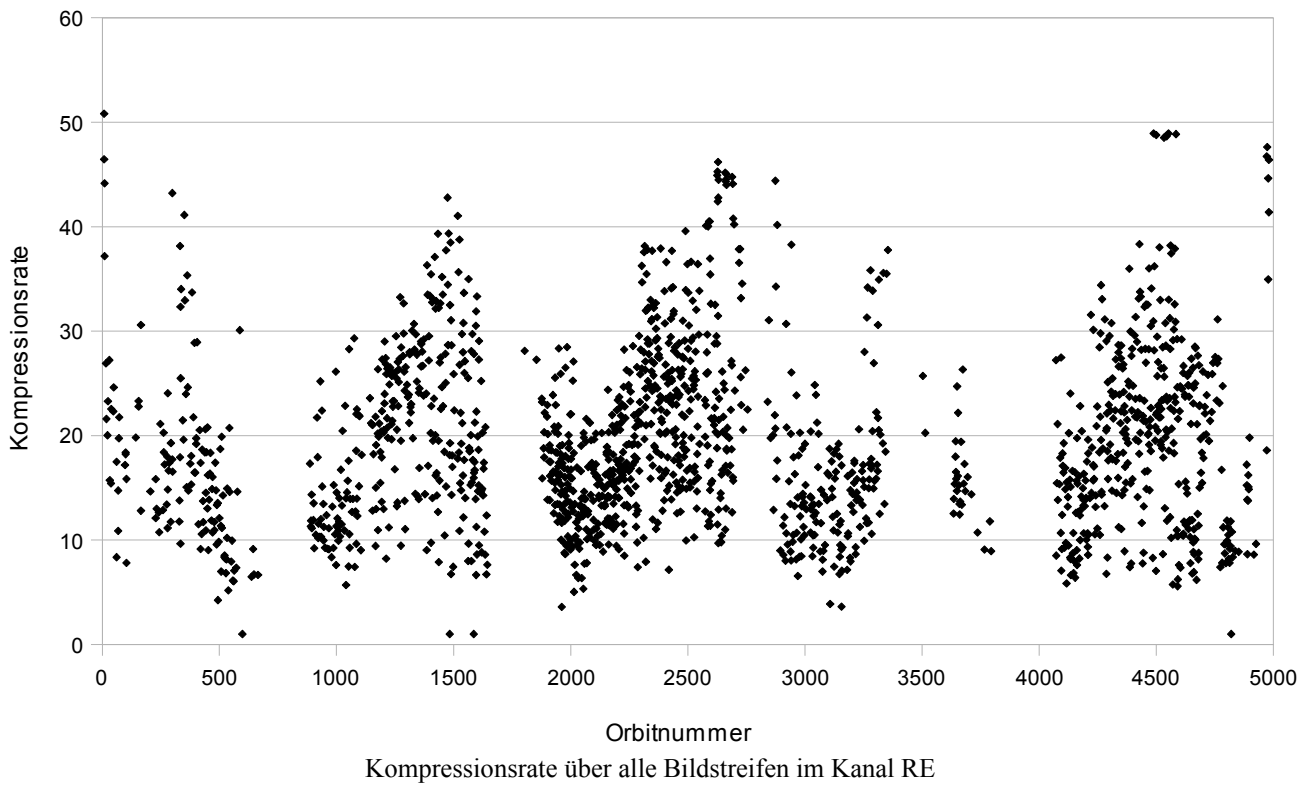
Kompressionsrate über alle Bildstreifen im Kanal S1



Kompressionsrate über alle Bildstreifen im Kanal S2







Anhang C: Tabellen

Streifen	ohne Filterung			Anisotrope Filterung			Gauß-Filterung		
	nach Zuordnung	nach Bündelausgleichung	Anteil eliminerter Punkte [%]	nach Zuordnung	nach Bündelausgleichung	Anteil eliminerter Punkte [%]	nach Zuordnung	nach Bündelausgleichung	Anteil eliminerter Punkte [%]
h1070_0001	36799	30934	10,0	57856	48776	11,4	58648	49409	11,6
h1293_0000	41146	34877	10,9	53249	46609	10,4	53044	46345	10,1
h1305_0000	12433	9067	14,2	30026	22715	13,5	28868	21421	13,5
h1354_0000	18082	14345	10,2	34539	30032	7,8	34346	29920	7,6
h1914_0000	22818	19124	11,1	32950	28556	9,2	32649	28160	9,9
h1917_0000	23684	20308	8,1	41093	36293	6,3	41209	36426	6,5
h1929_0000	52978	41239	10,7	91971	78021	10,0	91010	76422	10,6
h1944_0000	19960	16702	12,1	27512	23499	10,5	27615	23557	10,8
h1947_0000	14693	12502	10,0	21280	18333	9,6	21358	18399	9,9
h1950_0000	30855	25743	9,0	52468	45889	7,3	52506	45692	7,8
h1955_0000	25201	17872	18,0	48773	38614	12,5	48339	38039	12,9
h1958_0000	41335	36223	8,9	52733	47456	7,7	53017	46996	9,1
h1973_0000	39963	30861	18,6	45199	36709	16,9	46054	37020	17,8
h1996_0000	19598	15388	9,8	27166	22939	8,6	29154	24387	9,6
h2002_0000	11672	9894	8,8	16152	14253	8,6	16221	14270	8,7
h2007_0000	50356	39448	9,0	75136	61552	8,4	83158	70099	8,5
h2011_0001	23656	20193	11,1	32005	27264	10,5	32128	27253	11,0
h2013_0000	23630	18573	10,7	37821	32545	8,7	38844	32880	9,5
h2018_0000	16192	11097	11,7	21145	17499	8,5	23984	19169	9,8
h2033_0000	41416	35436	10,5	46037	41083	9,6	46175	41126	9,7
h2039_0000	41380	32406	16,6	53546	43970	15,0	54295	44303	15,5
h2044_0001	21469	18061	11,4	29545	25064	10,5	29469	24841	11,0
h2047_0000	43163	36120	9,6	53503	45343	10,5	54872	47644	9,4
h2057_0000	29844	24574	11,7	42502	35516	12,2	42433	35175	12,8
h2060_0000	33625	23758	12,4	58605	47767	8,8	63323	50871	9,3
h2063_0000	24074	19628	11,6	34526	29292	10,5	34089	28944	10,5
h2069_0000	60817	51116	11,6	67053	58340	10,5	68737	60111	10,2
h2074_0000	25543	20216	14,1	35884	29816	12,0	35726	29575	12,5
h2116_0000	44893	35803	17,0	59651	47690	16,4	59459	47547	16,7
h2138_0000	37527	29633	16,9	48529	39518	15,1	48410	39360	15,4
h2148_0000	15660	12186	9,0	31931	27858	7,3	32031	27836	7,5
h2149_0000	39035	31390	14,5	52643	44710	11,8	53436	45266	12,0
h2160_0001	19115	15362	16,2	27345	22515	14,2	27189	22367	14,6
h2167_0001	14038	11769	10,9	21604	18296	10,2	22055	18843	10,2
h2182_0000	32766	27123	10,6	49588	42227	10,4	50398	42662	10,5
h2191_0009	10313	7721	10,6	32904	27623	9,0	32394	26781	9,8
h2206_0002	23428	19384	12,6	28579	24693	11,6	28893	24880	12,0
h2216_0000	25117	20750	8,0	40659	37407	5,5	41081	37594	5,7
h2217_0000	17906	14563	10,3	37721	32684	8,5	38716	33295	9,4
h2222_0000	29103	22651	14,3	46650	38703	11,3	47928	39228	12,9
h2249_0000	14726	11647	11,6	25991	22206	10,6	26850	22786	10,7
h2254_0000	8723	7001	10,3	23236	19213	9,8	22497	18620	10,2
h2257_0000	16777	13181	14,9	23293	19846	13,1	23473	20034	12,8
h2276_0000	19957	16877	9,4	29604	25962	8,8	31643	27613	9,2
h2280_0000	30933	25815	10,0	44355	38853	9,2	44918	39322	9,0
Mittelwert	27698	22412	11,8	40990	34750	10,4	41614	35166	10,8

Tabelle 21: Punktzahlen ungefilterter und gefilterter Bilder

Streifen	X [m]			Y [m]			Z [m]		
	ungefiltert	Anisotrop	Gauß	ungefiltert	Anisotrop	Gauß	ungefiltert	Anisotrop	Gauß
h1070_0001	2,4	3,0	2,7	2,2	2,8	2,5	8,6	10,6	9,7
h1293_0000	2,5	3,1	2,8	2,2	2,7	2,4	8,5	10,5	9,3
h1305_0000	2,9	3,4	3,0	2,0	2,4	2,1	11,0	12,6	11,1
h1354_0000	3,2	3,7	3,2	2,4	3,0	2,6	12,6	13,9	12,0
h1914_0000	5,7	6,9	6,1	3,8	4,6	4,1	19,7	23,8	20,9
h1917_0000	7,9	9,4	8,7	6,0	7,2	6,7	27,1	32,1	29,8
h1929_0000	6,0	6,6	6,1	4,3	4,7	4,3	21,1	22,4	20,8
h1944_0000	4,7	5,6	5,1	3,7	4,4	4,0	16,5	19,9	18,1
h1947_0000	5,1	5,5	5,1	4,3	4,7	4,3	18,0	19,5	17,9
h1950_0000	5,3	6,6	6,0	3,7	4,6	4,2	18,6	22,8	20,7
h1955_0000	6,5	7,5	6,4	3,3	3,8	3,3	22,4	26,2	22,7
h1958_0000	5,7	6,3	5,9	4,7	5,2	4,9	20,1	22,1	20,6
h1973_0000	2,8	3,4	3,0	2,1	2,5	2,3	9,8	11,6	10,3
h1996_0000	2,4	3,3	2,8	2,1	2,9	2,5	9,1	12,1	10,4
h2002_0000	4,1	4,8	4,4	3,3	3,9	3,6	14,3	16,6	15,2
h2007_0000	1,9	2,7	2,4	1,6	2,4	2,1	6,9	9,8	8,5
h2011_0001	2,7	3,1	2,8	2,3	2,7	2,4	9,7	11,3	10,3
h2013_0000	3,8	5,2	4,5	3,0	4,1	3,6	13,3	17,9	15,6
h2018_0000	2,2	3,0	2,4	2,0	2,7	2,2	8,3	11,0	8,9
h2033_0000	2,6	3,1	2,8	2,2	2,5	2,4	9,3	10,6	9,9
h2039_0000	2,4	3,0	2,7	1,9	2,5	2,2	8,4	10,6	9,5
h2044_0001	3,1	3,7	3,4	2,7	3,3	2,9	11,3	13,5	12,1
h2047_0000	1,2	1,5	1,3	1,1	1,3	1,2	4,7	5,7	5,0
h2057_0000	2,6	3,1	2,7	2,4	2,8	2,5	9,4	11,0	9,7
h2060_0000	3,4	4,7	4,4	3,4	4,7	4,4	12,5	17,0	16,1
h2063_0000	2,4	2,9	2,6	2,1	2,5	2,3	9,0	10,7	9,6
h2069_0000	2,2	2,5	2,2	1,6	1,8	1,6	7,4	8,4	7,3
h2074_0000	2,3	2,6	2,4	1,8	2,2	2,0	8,3	9,6	8,7
h2116_0000	2,1	2,9	2,6	2,1	2,7	2,5	7,5	10,0	9,0
h2138_0000	2,0	2,8	2,6	1,7	2,3	2,1	7,2	10,0	9,0
h2148_0000	3,4	4,4	3,8	2,8	3,6	3,1	12,7	16,2	13,7
h2149_0000	3,1	3,9	3,6	2,9	3,7	3,4	11,0	14,0	12,9
h2160_0001	3,3	4,0	3,7	4,3	5,1	4,7	11,8	14,1	13,1
h2167_0001	3,9	4,6	4,4	3,1	3,7	3,5	14,2	16,9	15,9
h2182_0000	10,0	9,6	9,3	6,5	6,6	6,3	31,4	30,5	29,5
h2191_0009	7,4	7,5	6,4	5,9	5,9	5,1	26,2	26,1	22,5
h2206_0002	3,2	4,3	3,8	2,7	3,5	3,1	11,5	14,8	13,0
h2216_0000	16,0	16,7	16,3	10,3	11,2	10,9	55,8	58,1	57,1
h2217_0000	14,4	15,4	13,9	8,0	8,6	7,7	45,1	48,1	43,1
h2222_0000	5,3	6,6	6,0	3,4	4,2	3,8	18,3	22,9	20,7
h2249_0000	6,2	7,1	6,2	4,5	5,2	4,5	21,1	23,7	20,6
h2254_0000	8,7	9,1	8,2	5,1	5,6	5,0	28,7	30,7	27,5
h2257_0000	5,7	6,3	5,7	3,8	4,3	3,9	19,1	21,2	19,2
h2276_0000	6,4	7,9	7,3	4,9	6,0	5,5	22,0	27,4	25,2
h2280_0000	3,6	5,1	4,6	2,6	3,6	3,2	13,3	18,4	16,4
Mittelwert	4,5	5,3	4,8	3,4	4,0	3,6	15,8	18,4	16,6

Tabelle 22: Punktgenauigkeiten ungefilterter und gefilterter Bilder

Streifen	Auflösung [m]	X [m]		Y [m]		Z [m]	
		vor BA	nach BA	vor BA	nach BA	vor BA	nach BA
h1070_0001	15	13,9	3,2	13,0	3,0	50,7	11,7
h1293_0000	40	8,2	5,7	7,1	5,0	27,7	19,4
h1305_0000	35	7,6	7,1	5,5	5,0	29,9	27,6
h1354_0000	30	5,8	5,2	4,5	4,0	23,1	20,6
h1914_0000	45	13,6	9,4	9,0	6,2	46,8	32,5
h1917_0000	35	11,7	10,1	8,9	7,7	40,4	34,6
h1929_0000	30	11,4	8,2	8,3	5,9	40,0	28,6
h1944_0000	35	9,8	7,0	7,8	5,6	34,8	24,7
h1947_0000	35	9,2	7,0	7,8	5,9	32,6	24,5
h1950_0000	30	8,9	7,3	6,2	5,1	31,1	25,4
h1955_0000	50	18,9	14,6	9,7	7,5	64,5	49,8
h1958_0000	30	8,7	7,0	7,3	5,9	30,9	24,8
h1973_0000	35	9,0	6,3	6,7	4,7	31,4	22,1
h1996_0000	27	5,5	4,5	4,8	3,9	20,6	16,6
h2002_0000	45	11,6	7,6	9,3	6,1	40,7	26,6
h2007_0000	13	3,9	2,7	3,3	2,3	14,2	9,9
h2011_0001	25	11,1	4,3	9,8	3,8	40,1	15,4
h2013_0000	25	28,6	5,5	22,5	4,3	101,1	19,5
h2018_0000	25	14,1	4,3	12,9	3,9	53,5	16,2
h2033_0000	30	16,6	5,2	13,8	4,3	58,7	18,4
h2039_0000	28	14,7	5,1	12,1	4,2	51,5	17,7
h2044_0001	27	13,2	4,9	11,8	4,4	47,6	17,7
h2047_0000	28	19,1	4,9	16,9	4,4	72,0	18,5
h2057_0000	25	14,0	4,0	13,1	3,8	50,7	14,6
h2060_0000	13	13,3	4,8	13,3	4,8	49,5	17,9
h2063_0000	25	16,1	4,4	14,2	3,9	59,3	16,2
h2069_0000	35	19,8	7,7	14,2	5,5	66,4	25,7
h2074_0000	25	18,9	4,4	15,6	3,7	69,5	16,3
h2116_0000	25	11,4	4,3	11,1	4,2	39,7	14,9
h2138_0000	28	16,7	4,7	14,0	4,0	59,8	16,9
h2148_0000	35	19,3	6,0	15,5	4,8	71,3	22,1
h2149_0000	28	15,5	5,4	14,3	5,0	55,1	19,0
h2160_0001	28	14,4	5,2	18,7	6,8	51,0	18,4
h2167_0001	30	18,5	5,7	15,0	4,7	67,0	20,8
h2182_0000	30	20,0	11,8	13,0	7,7	62,6	36,9
h2191_0009	40	27,4	9,8	22,4	8,1	98,4	35,4
h2206_0002	40	28,9	7,1	24,6	6,1	101,9	25,1
h2216_0000	45	35,8	18,4	23,3	12,0	125,8	64,7
h2217_0000	50	45,5	18,2	25,0	10,0	141,3	56,4
h2222_0000	35	20,2	8,3	13,0	5,4	69,9	28,8
h2249_0000	50	13,3	10,7	9,7	7,7	44,9	35,9
h2254_0000	40	16,5	12,0	9,6	7,0	55,1	40,1
h2257_0000	60	16,9	12,9	11,3	8,6	56,7	43,4
h2276_0000	40	16,2	9,5	12,1	7,1	56,1	33,1
h2280_0000	35	10,5	7,0	7,5	5,0	38,0	25,5
Mittelwert	32,9	15,6	7,3	12,2	5,5	55,0	25,6

Tabelle 23: Theoretische Standardabweichungen der Strahlenschnitte für Kreuzkorrelation

Streifen	Auflösung [m]	X [m]		Y [m]		Z [m]	
		vor BA	nach BA	vor BA	nach BA	vor BA	nach BA
h1070_0001	15	14,0	2,4	13,0	2,2	51,1	8,6
h1293_0000	40	6,0	2,5	5,2	2,2	20,3	8,5
h1305_0000	35	4,0	2,9	2,8	2,0	15,3	11,0
h1354_0000	30	4,0	3,2	3,1	2,4	15,8	12,6
h1914_0000	45	11,4	5,7	7,5	3,8	39,3	19,7
h1917_0000	35	9,9	7,9	7,4	6,0	33,8	27,1
h1929_0000	30	9,8	6,0	7,0	4,3	34,5	21,1
h1944_0000	35	8,0	4,7	6,4	3,7	28,4	16,5
h1947_0000	35	7,9	5,1	6,6	4,3	27,7	18,0
h1950_0000	30	7,2	5,3	5,0	3,7	25,1	18,6
h1955_0000	50	14,3	6,5	7,3	3,3	49,2	22,4
h1958_0000	30	7,7	5,7	6,4	4,7	27,0	20,1
h1973_0000	35	7,0	2,8	5,2	2,1	24,5	9,8
h1996_0000	27	4,0	2,4	3,5	2,1	15,0	9,1
h2002_0000	45	9,3	4,1	7,4	3,3	32,4	14,3
h2007_0000	13	3,4	1,9	2,9	1,6	12,6	6,9
h2011_0001	25	10,9	2,7	9,5	2,3	39,7	9,7
h2013_0000	25	29,1	3,8	22,9	3,0	102,3	13,3
h2018_0000	25	14,0	2,2	12,7	2,0	53,3	8,3
h2033_0000	30	16,4	2,6	13,5	2,2	58,3	9,3
h2039_0000	28	14,1	2,4	11,4	1,9	49,6	8,4
h2044_0001	27	12,9	3,1	11,4	2,7	47,2	11,3
h2047_0000	28	18,1	1,2	16,2	1,1	69,4	4,7
h2057_0000	25	14,4	2,6	13,1	2,4	51,8	9,4
h2060_0000	13	12,8	3,4	13,0	3,4	47,6	12,5
h2063_0000	25	16,3	2,4	14,1	2,1	60,2	9,0
h2069_0000	35	16,9	2,2	12,2	1,6	56,5	7,4
h2074_0000	25	19,6	2,3	15,9	1,8	72,1	8,3
h2116_0000	25	11,4	2,1	11,0	2,1	39,6	7,5
h2138_0000	28	16,9	2,0	13,8	1,7	60,0	7,2
h2148_0000	35	19,3	3,4	15,5	2,8	71,4	12,7
h2149_0000	28	14,9	3,1	13,8	2,9	53,1	11,0
h2160_0001	28	14,2	3,3	18,3	4,3	50,3	11,8
h2167_0001	30	18,5	3,9	14,9	3,1	67,6	14,2
h2182_0000	30	18,6	10,0	12,2	6,5	58,4	31,4
h2191_0009	40	27,2	7,4	22,0	5,9	97,1	26,2
h2206_0002	40	29,4	3,2	24,7	2,7	104,1	11,5
h2216_0000	45	34,0	16,0	21,9	10,3	118,7	55,8
h2217_0000	50	43,1	14,4	23,9	8,0	135,4	45,1
h2222_0000	35	20,1	5,3	12,8	3,4	69,9	18,3
h2249_0000	50	10,2	6,2	7,4	4,5	34,8	21,1
h2254_0000	40	14,7	8,7	8,6	5,1	48,3	28,7
h2257_0000	60	11,5	5,7	7,8	3,8	38,8	19,1
h2276_0000	40	14,4	6,4	10,9	4,9	49,3	22,0
h2280_0000	35	9,2	3,6	6,6	2,6	33,7	13,3
Mittelwert	32,9	14,5	4,5	11,3	3,4	50,9	15,8

Tabelle 24: Theoretische Standardabweichungen der Strahlenschnitte für LSM

Streifen	Kreuzkorrelation			LSM		
	nach Zuordnung	nach Bündel- ausgleichung	Anteil elim. Punkte [%]	nach Zuordnung	nach Bündel- ausgleichung	Anteil elim. Punkte [%]
h1070_0001	46941	39914	9,2	36799	34366	10,0
h1293_0000	42475	38066	5,7	41146	39165	10,9
h1305_0000	13806	10448	11,1	12433	10568	14,2
h1354_0000	19247	16144	5,1	18082	15970	10,2
h1914_0000	24359	21049	8,5	22818	21515	11,1
h1917_0000	29014	25176	7,5	23684	22097	8,1
h1929_0000	58310	47150	7,9	52978	46167	10,7
h1944_0000	22853	19495	10,7	19960	19010	12,1
h1947_0000	16449	14360	7,9	14693	13891	10,0
h1950_0000	37589	31651	8,3	30855	28279	9,0
h1955_0000	27345	20938	11,8	25201	21783	18,0
h1958_0000	49073	43982	7,0	41335	39764	8,9
h1973_0000	43710	36556	12,0	39963	37901	18,6
h1996_0000	21542	17666	6,3	19598	17056	9,8
h2002_0000	12094	10721	4,8	11672	10852	8,8
h2007_0000	58275	47399	6,6	50356	43370	9,0
h2011_0001	26172	22994	8,4	23656	22720	11,1
h2013_0000	26803	21829	7,7	23630	20803	10,7
h2018_0000	17266	12770	5,9	16192	12574	11,7
h2033_0000	43002	38551	6,3	41416	39604	10,5
h2039_0000	45243	37900	11,0	41380	38871	16,6
h2044_0001	24183	20746	9,8	21469	20391	11,4
h2047_0000	49168	44393	3,0	43163	39973	9,6
h2057_0000	31897	27221	8,7	29844	27832	11,7
h2060_0000	59216	44518	10,8	33625	27106	12,4
h2063_0000	25880	22094	7,6	24074	22210	11,6
h2069_0000	65540	59047	5,3	60817	57838	11,6
h2074_0000	27276	23143	8,0	25543	23524	14,1
h2116_0000	49637	41843	12,3	44893	43131	17,0
h2138_0000	41169	34754	10,9	37527	35666	16,9
h2148_0000	16433	13640	3,2	15660	13389	9,0
h2149_0000	44258	37011	11,2	39035	36726	14,5
h2160_0001	22280	18481	13,7	19115	18337	16,2
h2167_0001	15479	13537	7,3	14038	13214	10,9
h2182_0000	37851	31364	10,8	32766	30331	10,6
h2191_0009	13699	10526	10,7	10313	8636	10,6
h2206_0002	24285	21524	6,4	23428	22177	12,6
h2216_0000	28345	24352	4,9	25117	22551	8,0
h2217_0000	25260	21047	9,8	17906	16230	10,3
h2222_0000	33109	26821	11,1	29103	26416	14,3
h2249_0000	16947	14289	6,6	14726	13171	11,6
h2254_0000	11109	9171	8,8	8723	7805	10,3
h2257_0000	19197	16650	6,5	16777	15487	14,9
h2276_0000	25903	22317	7,9	19957	18627	9,4
h2280_0000	33807	30024	4,5	30933	28678	10,0
Mittelwert	31633	26739	8,2	27698	22412	11,8

Tabelle 25: Punktzahlen für KK und LSM

Streifen	Genauigkeit der BiKo [Pixel]		Faktor zw. vor/nach Ausgl.		Faktor zw. KK/LSM	
	KK	LSM	KK	LSM	vor BA	nach BA
h1070_0001	0,24	0,17	4,3	5,9	1,0	1,4
h1293_0000	0,27	0,11	1,4	2,4	1,4	2,3
h1305_0000	0,35	0,14	1,1	1,4	1,9	2,5
h1354_0000	0,26	0,16	1,1	1,3	1,5	1,6
h1914_0000	0,29	0,17	1,4	2,0	1,2	1,6
h1917_0000	0,33	0,25	1,2	1,2	1,2	1,3
h1929_0000	0,26	0,18	1,4	1,6	1,2	1,4
h1944_0000	0,31	0,21	1,4	1,7	1,2	1,5
h1947_0000	0,32	0,23	1,3	1,5	1,2	1,4
h1950_0000	0,32	0,24	1,2	1,4	1,2	1,4
h1955_0000	0,35	0,15	1,3	2,2	1,3	2,2
h1958_0000	0,33	0,26	1,2	1,4	1,1	1,2
h1973_0000	0,30	0,13	1,4	2,5	1,3	2,2
h1996_0000	0,32	0,17	1,2	1,7	1,4	1,9
h2002_0000	0,30	0,16	1,5	2,3	1,3	1,9
h2007_0000	0,19	0,13	1,4	1,8	1,1	1,4
h2011_0001	0,32	0,19	2,6	4,1	1,0	1,6
h2013_0000	0,21	0,14	5,2	7,7	1,0	1,4
h2018_0000	0,32	0,16	3,3	6,4	1,0	2,0
h2033_0000	0,28	0,14	3,2	6,2	1,0	2,0
h2039_0000	0,35	0,16	2,9	5,9	1,0	2,1
h2044_0001	0,34	0,21	2,7	4,2	1,0	1,6
h2047_0000	0,31	0,08	3,9	14,9	1,0	4,0
h2057_0000	0,33	0,19	3,5	5,5	1,0	1,6
h2060_0000	0,33	0,23	2,8	3,8	1,0	1,4
h2063_0000	0,32	0,17	3,7	6,7	1,0	1,8
h2069_0000	0,35	0,10	2,6	7,6	1,2	3,5
h2074_0000	0,29	0,14	4,3	8,7	1,0	2,0
h2116_0000	0,31	0,15	2,7	5,3	1,0	2,0
h2138_0000	0,32	0,13	3,5	8,3	1,0	2,4
h2148_0000	0,27	0,15	3,2	5,6	1,0	1,7
h2149_0000	0,32	0,18	2,9	4,8	1,0	1,7
h2160_0001	0,34	0,21	2,8	4,3	1,0	1,6
h2167_0001	0,31	0,21	3,2	4,8	1,0	1,5
h2182_0000	0,49	0,42	1,7	1,9	1,1	1,2
h2191_0009	0,32	0,23	2,8	3,7	1,0	1,3
h2206_0002	0,29	0,13	4,1	9,1	1,0	2,2
h2216_0000	0,54	0,47	1,9	2,1	1,1	1,2
h2217_0000	0,41	0,33	2,5	3,0	1,0	1,3
h2222_0000	0,34	0,21	2,4	3,8	1,0	1,6
h2249_0000	0,31	0,18	1,3	1,6	1,3	1,7
h2254_0000	0,33	0,24	1,4	1,7	1,1	1,4
h2257_0000	0,40	0,18	1,3	2,0	1,5	2,3
h2276_0000	0,36	0,25	1,7	2,2	1,1	1,5
h2280_0000	0,30	0,15	1,5	2,5	1,1	1,9
Mittelwert	0,32	0,19	2,3	4,0	1,1	1,8

Tabelle 26: Genauigkeiten der Bildkoordinaten, vergleichende Faktoren

Streifen	Anteil Mehrstrahlpunkte KK [%]				Anteil Mehrstrahlpunkte LSM [%]			
	2	3	4	5	2	3	4	5
h1070_0001	6,2	4,7	5,1	84,0	6,5	4,4	4,5	84,6
h1293_0000	4,7	6,6	6,1	82,7	4,8	6,5	5,9	82,8
h1305_0000	14,3	25,6	16,2	43,9	14,9	26,0	16,1	43,1
h1354_0000	11,1	21,3	13,0	54,6	11,5	21,6	13,1	53,8
h1914_0000	5,5	8,5	6,5	79,5	5,7	8,2	6,1	80,0
h1917_0000	6,2	8,8	9,2	75,8	6,7	8,7	8,3	76,4
h1929_0000	12,2	10,1	7,5	70,2	12,8	9,9	7,4	69,8
h1944_0000	4,4	8,0	5,9	81,6	4,8	7,6	5,3	82,3
h1947_0000	5,1	8,6	6,3	80,1	5,5	8,5	5,9	80,1
h1950_0000	7,8	8,2	9,8	74,3	8,3	8,1	8,6	75,0
h1955_0000	12,8	11,2	11,8	64,2	13,5	11,3	11,3	64,0
h1958_0000	3,5	6,0	4,1	86,4	3,8	5,5	3,7	87,0
h1973_0000	4,9	7,6	7,1	80,4	5,2	7,5	6,5	80,9
h1996_0000	12,5	8,7	7,8	71,1	13,0	8,6	7,2	71,2
h2002_0000	6,9	10,2	6,9	76,1	7,0	10,0	6,6	76,4
h2007_0000	13,0	10,4	9,6	67,0	13,9	10,9	9,6	65,6
h2011_0001	3,8	3,7	3,1	89,4	3,8	3,5	3,0	89,7
h2013_0000	11,8	11,3	8,5	68,4	12,0	11,2	8,3	68,6
h2018_0000	21,4	9,6	8,5	60,4	22,4	9,6	8,6	59,5
h2033_0000	4,3	6,5	5,5	83,8	4,4	6,3	5,4	84,0
h2039_0000	5,9	6,1	5,7	82,3	6,1	6,1	5,5	82,4
h2044_0001	4,7	5,1	4,1	86,1	4,9	4,9	4,0	86,2
h2047_0000	6,7	12,5	10,6	70,3	7,2	12,9	11,0	68,8
h2057_0000	6,5	4,5	4,3	84,6	6,8	4,2	4,1	85,0
h2060_0000	16,1	12,8	21,7	49,4	19,4	12,3	19,8	48,5
h2063_0000	7,3	7,0	5,8	79,9	7,6	7,0	5,7	79,8
h2069_0000	4,7	7,9	6,1	81,3	4,9	7,9	6,1	81,2
h2074_0000	7,6	9,8	7,5	75,2	7,9	10,0	7,6	74,6
h2116_0000	3,8	4,3	3,7	88,2	3,9	4,2	3,3	88,6
h2138_0000	4,9	5,1	4,6	85,5	4,9	4,8	4,3	86,1
h2148_0000	14,1	13,3	11,0	61,6	14,4	13,3	10,7	61,6
h2149_0000	5,7	7,2	5,8	81,3	5,9	6,8	5,3	82,0
h2160_0001	3,7	4,9	6,6	84,7	4,0	5,0	6,1	84,9
h2167_0001	5,7	8,3	8,6	77,5	5,8	8,2	8,5	77,5
h2182_0000	6,8	10,8	7,8	74,6	7,3	10,6	7,3	74,8
h2191_0009	13,1	15,4	15,4	56,1	15,8	16,3	15,8	52,0
h2206_0002	5,2	9,4	12,6	72,8	5,3	9,3	12,5	72,9
h2216_0000	9,5	12,5	16,9	61,2	10,2	12,4	17,3	60,2
h2217_0000	7,5	11,7	9,8	71,0	9,2	12,3	9,2	69,3
h2222_0000	8,6	11,8	9,5	70,1	9,1	11,7	9,1	70,1
h2249_0000	9,8	13,0	10,5	66,7	10,6	13,5	10,6	65,4
h2254_0000	9,3	12,9	10,9	66,9	10,5	13,5	10,4	65,6
h2257_0000	7,1	9,3	8,2	75,5	7,7	9,3	7,8	75,3
h2276_0000	6,4	8,6	8,4	76,6	6,6	8,2	6,9	78,2
h2280_0000	7,0	12,4	17,2	63,4	7,3	12,5	16,9	63,4
Mittelwert	8,0	9,6	8,7	73,7	8,5	9,6	8,4	73,5

Tabelle 27: Anteile der Mehrstrahlpunkte

Streifen	X (vor/nach BA) [m]						Y (vor/nach BA) [m]						Z (vor/nach BA) [m]					
	Standard		Doppelt		Differenz		Standard		Doppelt		Differenz		Standard		Doppelt		Differenz	
h1293 0000	6,0	2,5	6,2	2,6	0,2	0,1	5,2	2,2	5,3	2,2	0,1	0,0	20,3	8,5	21,1	8,8	0,8	0,3
h1305 0000	4,0	2,9	4,2	3,1	0,2	0,2	2,8	2,0	3,0	2,2	0,2	0,2	15,3	11,0	15,5	11,7	0,2	0,7
h1354 0000	4,0	3,2	4,4	3,7	0,4	0,5	3,1	2,4	3,4	2,8	0,3	0,4	15,8	12,6	17,7	14,8	1,9	2,2
h1914 0000	11,4	5,7	12,2	7,0	0,8	1,3	7,5	3,8	8,0	4,6	0,5	0,8	39,3	19,7	42,9	24,6	3,6	4,9
h1917 0000	9,9	7,9	10,4	8,6	0,5	0,7	7,4	6,0	7,8	6,5	0,4	0,5	33,8	27,1	36,6	30,2	2,8	3,1
h1944 0000	8,0	4,7	8,6	5,1	0,6	0,4	6,4	3,7	6,8	4,1	0,4	0,4	28,4	16,5	30,2	18,1	1,8	1,6
h1947 0000	7,9	5,1	8,5	6,0	0,6	0,9	6,6	4,3	7,0	4,9	0,4	0,6	27,7	18,0	30,2	21,1	2,5	3,1
h1950 0000	7,2	5,3	7,5	5,8	0,3	0,5	5,0	3,7	5,2	4,0	0,2	0,3	25,1	18,6	26,2	20,3	1,1	1,7
h1955 0000	14,3	6,5	14,2	6,4	-0,1	-0,1	7,3	3,3	7,3	3,3	0,0	0,0	49,2	22,4	49,1	22,2	-0,1	-0,2
h1958 0000	7,7	5,7	7,9	6,0	0,2	0,3	6,4	4,7	6,5	5,0	0,1	0,3	27,0	20,1	28,1	21,3	1,1	1,2
h1973 0000	7,0	2,8	6,8	2,9	-0,2	0,1	5,2	2,1	5,1	2,1	-0,1	0,0	24,5	9,8	24,2	10,1	-0,3	0,3
h1996 0000	4,0	2,4	4,2	2,4	0,2	0,0	3,5	2,1	3,6	2,0	0,1	-0,1	15,0	9,1	15,9	9,0	0,9	-0,1
h2002 0000	9,3	4,1	9,3	4,6	0,0	0,5	7,4	3,3	7,4	3,6	0,0	0,3	32,4	14,3	33,0	16,2	0,6	1,9
h2011 0001	10,9	2,7	10,9	2,9	0,0	0,2	9,5	2,3	9,6	2,6	0,1	0,3	39,7	9,7	40,1	10,7	0,4	1,0
h2018 0000	14,0	2,2	14,1	1,9	0,1	-0,3	12,7	2,0	12,7	1,8	0,0	-0,2	53,3	8,3	55,4	7,7	2,1	-0,6
h2033 0000	16,4	2,6	16,9	3,5	0,5	0,9	13,5	2,2	13,7	2,9	0,2	0,7	58,3	9,3	60,6	12,6	2,3	3,3
h2039 0000	14,1	2,4	13,5	2,3	-0,6	-0,1	11,4	1,9	11,2	1,9	-0,2	0,0	49,6	8,4	49,0	8,4	-0,6	0,0
h2044 0001	12,9	3,1	13,5	3,3	0,6	0,2	11,4	2,7	11,7	2,9	0,3	0,2	47,2	11,3	49,3	12,0	2,1	0,7
h2047 0000	18,1	1,2	19,4	1,2	1,3	0,0	16,2	1,1	16,8	1,1	0,6	0,0	69,4	4,7	72,1	4,5	2,7	-0,2
h2057 0000	14,4	2,6	14,4	2,7	0,0	0,1	13,1	2,4	13,1	2,5	0,0	0,1	51,8	9,4	52,6	9,9	0,8	0,5
h2063 0000	16,3	2,4	16,6	2,8	0,3	0,4	14,1	2,1	14,5	2,5	0,4	0,4	60,2	9,0	62,2	10,6	2,0	1,6
h2069 0000	16,9	2,2	16,2	2,0	-0,7	-0,2	12,2	1,6	11,9	1,5	-0,3	-0,1	56,5	7,4	55,2	6,9	-1,3	-0,5
h2074 0000	19,6	2,3	19,4	2,8	-0,2	0,5	15,9	1,8	16,2	2,3	0,3	0,5	72,1	8,3	72,6	10,4	0,5	2,1
h2116 0000	11,4	2,1	11,4	1,9	0,0	-0,2	11,0	2,1	11,1	1,9	0,1	-0,2	39,6	7,5	39,7	6,7	0,1	-0,8
h2138 0000	16,9	2,0	16,8	1,7	-0,1	-0,3	13,8	1,7	14,0	1,4	0,2	-0,3	60,0	7,2	60,2	6,1	0,2	-1,1
h2148 0000	19,3	3,4	19,0	3,8	-0,3	0,4	15,5	2,8	15,3	3,1	-0,2	0,3	71,4	12,7	71,1	14,3	-0,3	1,6
h2149 0000	14,9	3,1	14,1	2,9	-0,8	-0,2	13,8	2,9	13,5	2,7	-0,3	-0,2	53,1	11,0	51,7	10,5	-1,4	-0,5
h2160 0001	14,2	3,3	13,8	3,2	-0,4	-0,1	18,3	4,3	18,3	4,2	0,0	-0,1	50,3	11,8	50,1	11,6	-0,2	-0,2
h2167 0001	18,5	3,9	18,8	4,0	0,3	0,1	14,9	3,1	15,2	3,2	0,3	0,1	67,6	14,2	69,1	14,8	1,5	0,6
h2182 0000	18,6	10,0	18,9	9,7	0,3	-0,3	12,2	6,5	12,3	6,3	0,1	-0,2	58,4	31,4	59,5	30,6	1,1	-0,8
h2191 0009	27,2	7,4	26,5	7,2	-0,7	-0,2	22,0	5,9	21,4	5,9	-0,6	0,0	97,1	26,2	94,7	25,9	-2,4	-0,3
h2206 0002	29,4	3,2	29,7	3,6	0,3	0,4	24,7	2,7	24,7	3,0	0,0	0,3	104,1	11,5	103,9	12,6	-0,2	1,1
h2216 0000	34,0	16,0	30,9	13,8	-3,1	-2,2	21,9	10,3	19,2	8,6	-2,7	-1,7	118,7	55,8	103,2	46,1	-15,5	-9,7
h2217 0000	43,1	14,4	40,5	12,7	-2,6	-1,7	23,9	8,0	22,6	7,1	-1,3	-0,9	135,4	45,1	129,0	40,6	-6,4	-4,5
h2222 0000	20,1	5,3	20,6	4,8	0,5	-0,5	12,8	3,4	13,3	3,1	0,5	-0,3	69,9	18,3	72,1	16,7	2,2	-1,6
h2249 0000	10,2	6,2	10,5	5,8	0,3	-0,4	7,4	4,5	7,7	4,2	0,3	-0,3	34,8	21,1	36,0	19,9	1,2	-1,2
h2254 0000	14,7	8,7	14,8	9,1	0,1	0,4	8,6	5,1	8,6	5,3	0,0	0,2	48,3	28,7	48,7	30,0	0,4	1,3
h2257 0000	11,5	5,7	10,8	4,5	-0,7	-1,2	7,8	3,8	7,5	3,1	-0,3	-0,7	38,8	19,1	37,2	15,7	-1,6	-3,4
h2276 0000	14,4	6,4	14,0	6,5	-0,4	0,1	10,9	4,9	10,7	5,0	-0,2	0,1	49,3	22,0	48,3	22,6	-1,0	0,6
h2280 0000	9,2	3,6	9,1	3,8	-0,1	0,2	6,6	2,6	6,5	2,7	-0,1	0,1	33,7	13,3	33,5	13,9	-0,2	0,6
Mittelwert	14,7	4,7	14,5	4,7	-0,1	0,0	11,2	3,5	11,2	3,5	0,0	0,0	51,1	16,3	51,2	16,5	0,1	0,3

Tabelle 28: Differenzen zwischen der Rechnung in der Standardauflösung und in der doppelten Auflösung

Dank

An dieser Stelle möchte ich den vielen Personen meinen Dank aussprechen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke möchte ich für die ausgezeichnete Betreuung dieser Arbeit danken. Als Mitglied des HRSC Co-Investigator Teams hat er es mir ermöglicht, im Rahmen dieses Projekts zu arbeiten. Er hat sich für die manchmal langen Diskussionen immer Zeit genommen und hat oft wertvolle Hinweise zu Literatur gegeben oder Einfälle zur Weiterentwicklung gehabt. Mit seiner klaren wissenschaftlichen Methodik hat er meine Konzepte hinterfragt und so maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön vom Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover danke ich für die Übernahme des Gutachtens.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Gerhard Neukum von der Fachrichtung Planetologie und Fernerkundung der Freien Universität Berlin gilt mein besonderer Dank. Als Principal Investigator des HRSC-Experiments hat er die Kamera konzipiert und das Projekt auf den Weg gebracht. Für die Übernahme des Gutachtens bin ich ihm sehr dankbar.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. i.R. Dr.-Ing. E.h. Heinrich Ebner, dem ehemaligen Leiter des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München, möchte ich herzlich für die gute Zusammenarbeit im Projekt danken.

Dem DLR danke ich für die finanzielle Unterstützung des Projekts aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 50QM0104.

Meinen besonderen Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Michael Spiegel, MVTec Software GmbH, für die hervorragende Zusammenarbeit im Projekt „HRSC auf Mars Express“. Oft haben sich lange Diskussionen am Telefon oder per E-Mail ergeben, die die Arbeit voran gebracht haben. Auch nach seinem Ausscheiden aus dem Projekt hat er sich ohne zu zögern dazu bereit erklärt, Bündelausgleichungen zur Evaluierung meiner Ergebnisse durchzuführen.

Herrn Dipl.-Math.-techn. Rüdiger Brand, ESG Elektroniksystem-und Logistik-GmbH, danke ich für die Unterstützung während der Anfangsphase des Projekts. Er hat mir insbesondere dabei geholfen, mich in die Software hwmatch1 einzuarbeiten.

Den Mitarbeitern des Instituts für Planetenforschung des DLR in Berlin-Adlershof danke ich für die technische Durchführung des Projekts „HRSC auf Mars Express“. Für die Unterstützung in Fragen bezüglich Software oder der Mission danke ich insbesondere Herrn Dr. Thomas Roatsch, Herrn Dipl.-Ing. Frank Scholten, Herrn M.A. Dipl.-Geol. Klaus Gwinner, Frau Dipl.-Phys. Marita Wählich, Herrn Prof. Dr. Jürgen Oberst, Herrn Dr. Bernd Giese und Herrn Dr. Klaus-Dieter Matz. Ebenso danke ich den Mitarbeitern der Fachrichtung Planetologie und Fernerkundung der FU Berlin und den Mitarbeitern von ESTEC und ESOC für die Planung und Durchführung der Mars Express-Mission.

Bei meinen jetzigen und ehemaligen Kollegen des Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation möchte ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Insbesondere danke ich Frau Dipl.-Ing. Janet Heuwold und Herrn Dr.-Ing. Kian Pakzad für das Korrekturlesen der Arbeit und Dipl.-Ing. Adelheid Elmhorst, Dipl.-Ing. Ulla Wißmann und Dr.-Ing. Karsten Jacobsen für die technische Unterstützung. Für die Entlastung in der Lehre während der Entstehung dieser Arbeit danke ich Dipl.-Ing. Petra Helmholz, Dipl.-Ing. Anne Grote, Dipl.-Ing. Thorsten Hödl und Dipl.-Ing. Jan Dirk Wegner.

Zum Schluss möchte ich mich noch für die moralische Unterstützung meinen Eltern und meiner Freundin danken, die mich immer ermuntert und unterstützt haben, diese Arbeit abzuschließen.

Lebenslauf

Angaben zur Person

Name	Ralph Schmidt
Geburtsdatum und -ort	25.03.1973, Hildesheim
Staatsangehörigkeit	deutsch

Ausbildung

8/1979–7/1983	Didrik-Pining-Schule Hildesheim, Grundschule
8/1983–7/1985	Orientierungsstufe Ost Hildesheim
8/1985–6/1992	Scharnhorstgymnasium Hildesheim mit Abschluss Allgemeine Hochschulreife
7/1992–12/1993	Wehrdienst, zuletzt bei Nachschubkompanie 10 in Hildesheim, Obergefreiter
1/1994–3/1994	Praktikum Stadtvermessungsamt Hildesheim
4/1994–8/1994	Verschiedene Tätigkeiten bei einer Zeitarbeitsagentur
10/1994–3/2000	Studium der Geodäsie an der Leibniz Universität Hannover mit Abschluss Diplom-Ingenieur mit der Gesamtnote „sehr gut“ Titel der Diplomarbeit: Untersuchung des Bildanalyse-Systems eCognition

Beruflicher Werdegang

4/2000–12/2001	Erstellung einer eLearning Umgebung und eines Lerninhalts für die Digitale Bildverarbeitung im BMBF-Projekt „Neue Medien in der Bildung“ am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität Hannover als Wissenschaftlicher Mitarbeiter
seit 1/2002	BMBF-Projekt „HRSC auf Mars Express – Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten“ am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität Hannover als Wissenschaftlicher Mitarbeiter