

BESTIMMUNG DER ÄUßEREN ORIENTIERUNG DES MARS EXPRESS ORBITERS

**C. HEIPKE¹, R. SCHMIDT¹, H. EBNER², M. SPIEGEL²,
G. NEUKUM³ UND DAS HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM**

Zusammenfassung: Seit Januar 2004 bildet die High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord der ESA (European Space Agency) Mission Mars Express die Oberfläche des Planeten Mars in Farbe, stereoskopisch und in hoher Auflösung ab. Das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover und der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung (LPF) der Technischen Universität München prozessieren gemeinsam die Daten der HRSC: Während der zwei Jahre dauernden Mission wird in einer kombinierten Bündelausgleichung unter Verwendung automatisch extrahierter Verknüpfungspunkte und Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) Daten die äußere Orientierung der Mars Express Sonde bestimmt. Diese Arbeit beschreibt die verwendeten Methoden der digitalen Bildzuordnung zur Bestimmung der Verknüpfungspunkte und die BA. Anhand von drei Orbits werden die Ergebnisse des Matching und die erzielten Genauigkeiten der BA präsentiert und bewertet.

1 Einleitung

Im Juni 2003 ist vom Kosmodrom in Baikonur, Kasachstan die ESA Mission Mars Express gestartet worden. Nach einer sechsmonatigen Reise ist die Sonde erfolgreich in eine polare Umlaufbahn um den Mars eingeschwenkt worden. Während der zwei Jahre dauernden Mission wird die High Resolution Stereo Camera (HRSC) einen Großteil der Marsoberfläche aufnehmen. Die HRSC ist ein Zeilenscanner und besteht aus insgesamt neun parallel angeordneten CCD-Sensoren, die eine simultane Bildaufnahme stereoskopisch und multispektral ermöglichen (ALBERTZ ET AL., 1993). Im Perizentrum – etwa 300 km über der Marsoberfläche – wird eine Bodenauflösung von etwa 12 m erreicht. Die Camera Unit (CU) der HRSC beinhaltet zusätzlich einen Super Resolution Channel (SRC), der flächenhafte im HRSC-Schwad eingebettete Bilder mit einer Auflösung von bis zu 2,5 m liefern kann.

Die dreidimensionale Position und Lage der Sonde wird fortwährend von der ESA durch Kombination von Dopplermessungen, Entfernungsmessungen, Triangulationen und eines Sternensensors bestimmt. Diese Messungen resultieren in einer dreidimensionalen Position und Lage von Mars Express in Abhängigkeit von der Zeit, die als genäherte äußere Orientierung in der klassischen Photogrammetrie angesehen werden kann. Allerdings reichen diese Werte für eine hochgenaue photogrammetrische Punktbestimmung nicht aus. Aus diesem Grund werden diese Messungen als Näherungswerte für die unbekannt Parameter der äußeren Orientierung in die Bündelausgleichung (BA) eingeführt. Außerdem werden in

¹ Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke / Dipl.-Ing. Ralph Schmidt, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, Germany, schmidt@ipi.uni-hannover.de

² Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner / Dipl.-Ing. Michael Spiegel, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München, Germany, spiegel@bv.tum.de

³ Prof. Dr. G. Neukum, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, Germany, gneukum@zedat.fu-berlin.de

der BA aus digitaler Bildzuordnung gewonnene Verknüpfungspunkte verwendet. Um die Ergebnisse in ein marsfestes Koordinatensystem transformieren zu können, werden zusätzlich Passpunkte benötigt. Da auf dem Mars nur wenige klassische Passpunkte mit nur einer geringen Genauigkeit existieren, wird hierfür ein global vorhandenes digitales Geländemodell (DGM) verwendet.

In Kapitel zwei dieser Arbeit werden die angewandten Methoden der photogrammetrischen Punktbestimmung, der digitalen Bildzuordnung und der BA vorgestellt. In Kapitel drei werden die Ergebnisse des Matching und die erzielten Genauigkeiten der BA präsentiert und diskutiert.

2 Photogrammetrische Punktbestimmung

Die Prozessierung der HRSC Daten gliedert sich in zwei Arbeitsschritte. Zunächst werden Verknüpfungspunkte mit einer am IPI Hannover entwickelten Software extrahiert. Diese Verknüpfungspunkte dienen zusammen mit der beobachteten äußeren Orientierung und dem DGM als Eingangsdaten für die BA, die am LPF in München entwickelt wurde. Mit der resultierenden verbesserten äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters ist es möglich, hochwertige abgeleitete Produkte wie DGMs, Orthophotos und 3D-Ansichten aus den Bildern zu erstellen.

Das Prinzip der Punktübertragung von Objekt- zu Bildkoordinaten bei 3-Zeilen-Scannern wird in BRAND ET AL. (1997) erläutert. Ausgangspunkt sind die erweiterten Kollinearitätsgleichungen für 3-Zeilen-Scanner (EBNER ET AL., 1994):

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{pmatrix} = \lambda M^T (\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa) D^T (\varphi, \omega, \kappa) \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 + \Delta X_0 \\ Y_0 + \Delta Y_0 \\ Z_0 + \Delta Z_0 \end{pmatrix} \right] \quad (1)$$

Die äußere Orientierung bezieht sich auf ein Kamerakoordinatensystem, welches für alle CCD-Zeilen gemeinsam definiert ist. Für einen bestimmten Auslesezyklus n ist die äußere Orientierung durch $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$ gegeben. Die innere Orientierung ist durch die drei Parameter x_0, y_0, c pro CCD-Zeile im Bildkoordinatensystem definiert. Die Transformation zwischen dem Bild- und dem Kamerakoordinatensystem ist durch $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa$ gegeben, die bei einer geometrischen Kalibrierung für jede CCD-Zeile bestimmt wurden. M und D sind Rotationsmatrizen, λ ist ein Maßstabsfaktor. Die Bildkoordinaten sind durch x und y gegeben, welche durch digitale Bildzuordnung automatisch bestimmt werden.

Die innere Orientierung der HRSC wurde in einem Labor bei Dornier, Friedrichshafen kalibriert und während der sechsmonatigen Reise zum Mars durch Sternenbeobachtungen überprüft. Bisher konnten keine Abweichungen von der Kalibrierung festgestellt werden, so dass die innere Orientierung als stabil betrachtet wird.

2.1 Matching

Die Bildzuordnung folgt einer „vom Groben ins Feine“-Strategie, d.h. das Matching-Ergebnis wird schrittweise durch Bildpyramiden verbessert. Als Eingangsdaten werden die HRSC-Bilder, die beobachtete äußere Orientierung und die Kalibrierungsdaten der inneren

Orientierung benötigt. Zusätzlich kann ein DGM als Näherungsinformation genutzt werden. Auf dem Mars ist ein hochgenaues DGM vorhanden, welches aus Daten des MOLA-Instruments abgeleitet wurde (NEUMANN ET AL., 2003).

Zu Beginn werden Punktmerkmale mit Hilfe des Förstner-Operators (FÖRSTNER, 1986) extrahiert, und die Bilder werden paarweise in allen Kombinationen zugeordnet, wobei der Kreuzkorrelationskoeffizient als Ähnlichkeitsmaß dient. Jedes Bild wird in Unterbereiche eingeteilt, um eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte über den gesamten Bereich sicherzustellen. Um Mehrdeutigkeiten und Rechenzeit zu reduzieren, werden bei der Übertragung eines Features von einem Bild zum nächsten eine Näherungsposition und ein Suchraum für den korrespondierenden Punkt berechnet. Da für 3-Zeilen-Scanner keine Epipolargeometrie existiert, wird ein Feature von einem Bild zum nächsten nach Formel (1) transformiert. Für die Transformation vom Objekt- zum Bildkoordinatensystem als Funktion der Bildzeile (Auslesezyklus) n muss eine zusätzliche Bedingung (2) erfüllt sein, wobei x in Flugrichtung zeigt.

$$x(n)=x(n, X_0(n), Y_0(n), Z_0(n), \varphi(n), \omega(n), \kappa(n))=0 \quad (2)$$

Dieses Problem kann mit der bekannten Newton-Methode für die obige Nullstellensuche gelöst werden, wobei die Ableitung $x'(n_i)$ durch die Pixelgröße des Bildes ersetzt wird.

$$\begin{aligned} n_0 &= \text{Initialisierungswert für die Bildzeile} \\ n_{i+1} &= n_i - x(n_i) / \text{Pixelgröße} \quad i = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Nachdem alle überlappenden Bilder paarweise in allen Kombinationen gematcht wurden, wird ein ungerichteter Graph aufgebaut. Die Knoten des Graphen sind die Punktmerkmale, die Kanten sind die Matching-Verbindungen untereinander. Dieser Graph wird in Zusammenhangskomponenten unterteilt. Im nächsten Schritt werden die Punktupel gebildet, wobei ein Tupel dadurch charakterisiert ist, dass nur ein Feature pro Bild zugelassen wird. Die Komplexität dieses Problems kann allerdings exponentiell wachsen. Anstatt Suchbäume oder Binärsuche anzuwenden, wird ein RANSAC (Random Sample Consensus) Algorithmus (FISCHLER & BOLLES, 1981) verwendet. Diese Methode beruht auf der Tatsache, dass die Wahrscheinlichkeit, eine gute Konfiguration (richtiges Tupel) durch zufällige Auswahl von Beobachtungen (Feature eines Teilgraphs) zu treffen, nach einer bestimmten Zahl von Versuchen sehr hoch ist. Der Vorteil daran ist die hohe Wahrscheinlichkeit, einen guten Punkt zu erhalten. Durch eine geometrische Konsistenzprüfung werden außerdem grobe Fehler eliminiert (BRAND & HEIPKE, 1998).

Von der Startpyramide (niedrigste Auflösung) bis zur so genannten Zwischenebene (mittlere Auflösung) wird das Feature Based Matching (FBM) im gesamten Bild durchgeführt. Bewegt man sich auf der Bildpyramide nach unten, steigt sowohl die Bildgröße als auch die Anzahl der extrahierten Features. Das Matchen im gesamten Bild würde neben der stark ansteigenden Rechenzeit auch zu viele Verknüpfungspunkte für die Kameraorientierung liefern. Daher wird das Matching unterhalb der Zwischenebene lediglich in ausgewählten „Image Chips“ durchgeführt. Das bedeutet, dass korrespondierende Punkte nur in Bereichen gesucht werden, in denen schon vorher Punkte aufgrund guter Textur gefunden wurden (TANG & HEIPKE, 1996).

Um das Matching-Ergebnis weiter zu verfeinern, wird Multi Image Least Squares Matching (MILSM) nach dem Ansatz von KRUPNIK (1994) durchgeführt, in dem die Verknüpfungspunkte in allen Bildern gleichzeitig gematcht werden. Eine detaillierte Beschreibung des implementierten Verfahrens befindet sich in HEIPKE ET AL. (2004). Da Least Squares Matching (LSM) das genaueste Bildzuordnungsverfahren ist, kann das Ergebnis des FBM verbessert werden. In unserer Implementierung kann pro Pyramidenlevel entschieden werden, ob MILSM angesetzt werden soll oder nicht. Um Rechenzeit zu sparen, ist es sinnvoll, nur auf der letzten Ebene (Originalauflösung) MILSM durchzuführen.

Am Schluss werden durch Vorwärtseinschneiden der Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte Modellpunkte berechnet. Diese dienen anstatt der MOLA-Punkte als Näherungsinformation zur Suchraumminimierung auf der nächstniedrigeren Ebene. Eine detailliertere Beschreibung des Matching-Verfahrens ist in SCHMIDT & BRAND (2003) beschrieben.

2.2 Bündelausgleichung mit Passinformation

Die BA nutzt das von HOFMANN ET AL. (1982) vorgeschlagene Konzept, bei dem die Parameter der äußeren Orientierung nur an wenigen ausgewählten Bildzeilen, den so genannten Orientierungsbildern, bestimmt werden (SPIEGEL ET AL., 2003). Die äußere Orientierung aller anderen Bildzeilen wird aus den Werten der Orientierungsbilder interpoliert. Die Unterschiede an jeder Bildzeile werden als Korrekturterm betrachtet, der zu den interpolierten Werten addiert werden muss. Diese Methode hält die Anzahl der Orientierungsparameter niedrig und, was noch wichtiger ist, berücksichtigt die gute relative Genauigkeit der beobachteten Orientierungsparameter. Das mathematische Modell für die photogrammetrische Punktbestimmung mit einer 3-Zeilen-Kamera basiert auf den bekannten Kollinearitätsgleichungen (1).

Ausgangspunkt der Diskussion über die Nutzung eines DGMs als Passinformation in der BA ist ein von SPIEGEL ET AL. (2003) vorgestellter Ansatz. Dieser verwendet die Kleinste-Quadrate-Ausgleichung mit zusätzlichen Bedingungen, um einen Zusammenhang zwischen DGM und BA ohne Passpunkte herzustellen. Im Fall vom Mars ist es möglich, MOLA-Daten als Passinformation zu nutzen. Ein Weg ist die Nutzung der von MOLA-Punkten abgeleiteten Geländeoberfläche, in welche die zugeordneten HRSC-Bildpunkte eingepasst werden. Da mehr MOLA-Punkte als HRSC-Punkte vorhanden sind, ist dieser Ansatz vorteilhaft.

An Stellen, an denen HRSC-Punkte verfügbar sind, können die MOLA-Daten als lokale Flächen beschrieben werden. Eine Fläche kann entweder von drei originalen MOLA-Punkten oder von vier MOLA DGM Rasterpunkten aufgespannt werden, wobei die DGM-Punkte wiederum aus den originalen MOLA-Punkten interpoliert werden. Im ersten Fall ist die Fläche eine Ebene, die durch drei unregelmäßig angeordnete MOLA Punkte beschrieben wird. Hierbei wird der vertikale Abstand d vom HRSC-Punkt H zur Ebene (M_1 , M_2 und M_3) definiert (Abb. 3, links). Im zweiten Fall, soll der HRSC-Punkt auf einer bilinearen Fläche liegen, die durch vier benachbarte MOLA-Punkte definiert ist, welche den HRSC-Punkt umschließen und eine Gitterstruktur aufweisen. Die Distanz d ist als Abstand zwischen dem HRSC-Punkt H und der bilinearen Fläche definiert, welche von den vier Punkten M'_1 , M'_2 , M'_3 und M'_4 (Abb. 3, rechts) festgelegt ist. In der verwendeten BA wird letzterer Ansatz angewandt, da die Vorteile des MOLA DGMs gegenüber den rohen MOLA-Daten überwiegen.

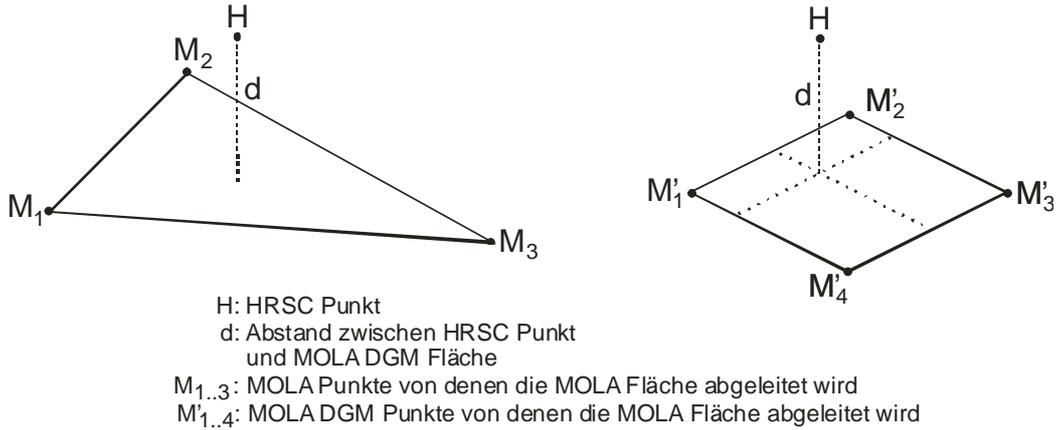


Abb. 1: Links: Oberfläche aus original MOLA Punkten. Rechts: Gleichmäßiges DGM Gitter

Das mathematische Modell der BA ist in Gleichung (4) angegeben,

$$\begin{aligned} v_x &= f(X, Y, Z, x_0, y_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa) - x_i \\ v_y &= f(X, Y, Z, x_0, y_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa) - y_i \end{aligned} \quad (4)$$

mit:

$$X_0 = \bar{X}_{B_0} + \bar{X}_0, \quad Y_0 = \bar{Y}_{B_0} + \bar{Y}_0, \quad Z_0 = \bar{Z}_{B_0} + \bar{Z}_0, \quad \varphi = \bar{\varphi}_B + \bar{\varphi}, \quad \omega = \bar{\omega}_B + \bar{\omega}, \quad \kappa = \bar{\kappa}_B + \bar{\kappa}$$

wobei sich die äußere Orientierung aus Nullpunktkorrekturen ($\bar{X}_{B_0}, \bar{Y}_{B_0}, \bar{Z}_{B_0}, \bar{\varphi}_B, \bar{\omega}_B, \bar{\kappa}_B$) (im Weiteren wird der engl. Begriff Bias verwendet), die für den ganzen Streifen Gültigkeit haben, und Termen ($\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0, \bar{\varphi}, \bar{\omega}, \bar{\kappa}$), die nur für jeweils eine Zeile gelten, zusammensetzen.

Zusätzlich wird für jeden HRSC-Punkt nur eine Beobachtungsgleichung (5)

$$v_d + d = f(X_H, Y_H, Z_H, X_{M_i}, Y_{M_i}, Z_{M_i}) \quad i = 1..4 \quad (5)$$

mit drei Unbekannten (X, Y, Z der HRSC-Verknüpfungspunkte), einer Beobachtung (Differenz d zwischen HRSC Punkt und MOLA Oberfläche) und zwölf Konstanten (X, Y, Z für alle vier MOLA DGM Punkte) genutzt. Die Genauigkeit der beobachteten Differenzen wird für das weiter verfolgte Verfahren direkt durch die Genauigkeit der MOLA Punkte bestimmt.

3 Auswertung von HRSC Bildern

In diesem Abschnitt werden zuerst die ausgewerteten HRSC-Bilder beschrieben. Die Ergebnisse des Matchings und der BA werden im zweiten Teil auf Basis der Orbits 18, 22 und 68 präsentiert und diskutiert.

3.1 Daten

Jede CCD Zeile der HRSC besteht aus 5176 aktiven Pixeln, welche auf der Marsoberfläche eine Breite von etwa 65 km abdecken. Die Streifen können aus bis zu 300.000 Zeilen

bestehen und einen Bereich auf der Oberfläche von 4.000 km in Flugrichtung überdecken. Aufgrund einer limitierten Übertragungsbandbreite zwischen Mars und Erde kann nur der Nadir-Kanal mit der vollen Auflösung empfangen werden. Die Auflösung der zwei Stereokanäle wird im Allgemeinen um einen Faktor von 2, die restlichen Kanäle um einen Faktor von 4 reduziert. Um die gleiche Skalierung der Kanäle zu erreichen wird der Nadir-Kanal für das Matching auf die Auflösung der Stereokanäle umgerechnet. Abhängig von der überdeckten Marsregion zeigen die Bilder Bereiche mit guter Textur und Bereiche mit sehr geringem Kontrast (Abb. 2).

Die vorliegende Untersuchung beruht auf Bilderstreifen der Orbits 18, 22 und 68, die zu Beginn der Aufnahmeperiode der Mars Express Mission aufgenommen wurden. Die Beobachtungen der äußeren Orientierung, die Kalibrierungsdaten der inneren Orientierung, sowie das MOLA DGM werden als Input für das Matching und die BA genutzt. Außerdem werden die HRSC Bilder für das Matching verwendet. Die a priori Genauigkeit der äußeren Orientierung wurde mit einem Wert von 1000 m für die Position und 28 mgon für die Lage in die BA eingeführt. Die Flugbahn des Orbiters wird als sehr stabil betrachtet.

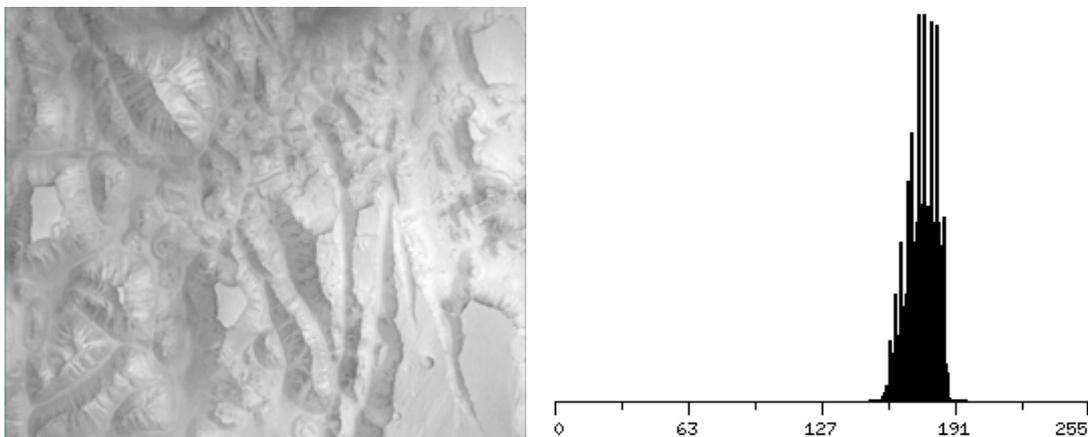


Abb. 2: Links: Ausschnitt aus Orbit 68 mit guter Textur. Rechts: Histogramm aus Bildregion mit niedrigem Kontrast

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Matching-Ergebnisse

In einer ersten Auswertung werden die reinen Strahlenschnitte der Verknüpfungspunkte analysiert. Die von der ESA bestimmten Werte der äußeren Orientierung werden als fehlerfrei eingeführt und es wird kein DGM in der BA genutzt. Dieses Vorgehen kann als Vorwärtsschnitt betrachtet werden. Die erreichten Werte werden mit den Ergebnissen der BA verglichen, bei der für φ and κ jeweils ein Bias für die ganze Bahn geschätzt wird. Ein Bias für φ and κ wird eingeführt, da nur diese zwei Parameter durch die alleinige Nutzung der Verknüpfungspunkte verbessert werden können. Der Bias für die anderen vier Orientierungsparameter X_0 , Y_0 , Z_0 und ω kann nur durch Passinformation bestimmt werden.

Tab. 1 zeigt die Genauigkeiten der Objektkoordinaten der Strahlenschnitte für die ausgewählten Orbits. Der linke Wert ist die Standardabweichung der Strahlenschnitte mit der von der ESA gegebenen äußeren Orientierung. Der rechte Wert zeigt die für die Strahlenschnitte erreichte theoretische Standardabweichung nach der Verbesserung von φ and κ . Die Standardabweichung aller untersuchten Orbits liegt im Bereich von etwa 6 bis 11 m in

X und Y, abhängig von den unterschiedlichen Flughöhen. Die Z Genauigkeiten von allen Orbits liegen im Bereich von etwa 18 bis 22 m. Die Standardabweichung der Strahlenschnitte wird um den Faktor 2 bis 3 verbessert, und eine abschließende Genauigkeit von etwa 0.4 Pixel in X und Y und 0.8 Pixel in Z wird erreicht.

Orbit	Höhe [km]	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_Z [m]
18	275 - 347	11,0 / 5,9	13,0 / 6,6	34,0 / 18,0
22	311 - 941	13,0 / 7,8	18,0 / 9,2	42,0 / 22,0
68	269 - 505	30,3 / 10,3	26,6 / 10,9	48,8 / 17,8

Tab. 1: Theoretische Standardabweichung der Objektkoordinaten

3.2.2 Ergebnisse der Bündelausgleichung

Der zweite Teil der Ergebnisse der Auswertung zeigt die Genauigkeiten nach dem Einpassen der HRSC-Punkte ins MOLA DGM. Hier wird der Bias aller sechs Parameter der äußeren Orientierung (X_0 , Y_0 , Z_0 , φ , ω , κ) entlang der gesamten Flugbahn verbessert. Tab. 2 zeigt die verbesserten Werte und deren Standardabweichungen für die drei Orbits. In den meisten Fällen können die Werte hoch signifikant bestimmt werden, da die Genauigkeiten des Bias geringer als die Werte des Bias selbst sind.

Orbit		X_0 [m]	Y_0 [m]	Z_0 [m]	φ [mgon]	ω [mgon]	κ [mgon]
18	Bias Wert	90,4	-64,6	-38,2	-51,1	-64,4	-6,2
	Bias σ	7,3	11,0	1,6	0,3	1,5	0,1
22	Bias Wert	-300,5	-183,9	-81,8	-70,1	-26,3	-8,9
	Bias σ	24,5	39,5	3,5	0,5	2,7	0,7
68	Bias Wert	-12,1	-112,3	-41,2	-24,9	-12,1	-35,9
	Bias σ	10,7	16,7	6,7	0,4	1,9	0,6

Tab. 2: Theoretische Standardabweichung der Orbitbestimmung

Die Standardabweichungen der Objektkoordinaten sind in Tab. 3 für die Orbits 18, 22 und 68 dargestellt und hängen von zwei Ergebnissen ab. Dies sind zum einen die Genauigkeiten der Strahlenschnitte (Tab. 1), die die Genauigkeit innerhalb des Orbits darstellen und zum anderen die Genauigkeiten der absoluten Orientierung zwischen Orbit und MOLA DGM (Tab. 2). Die absolute Genauigkeit der Punktbestimmung ist deshalb eine Kombination dieser beiden Genauigkeiten. Die Standardabweichung der Objektpunkte in allen 3 Dimensionen beträgt weniger als 20 m. Aufgrund der höheren Flughöhe sind die Standardabweichungen bei Orbit 22 etwas größer.

Orbit	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_Z [m]
18	9,1	10,6	17,0
22	25,6	35,4	20,9
68	14,4	16,7	17,5

Tab. 3: Theoretische Standardabweichung der in das MOLA DGM eingepassten HRSC Punkte

Schließlich wurden die quadratischen Mittelwerte (RMS) der Z-Differenzen zwischen den Objektkoordinaten der HRSC-Verknüpfungspunkte und dem MOLA DGM untersucht.

Hierbei wurden die Ergebnisse ohne DGM als Passinformation mit den Ergebnissen der BA mit DGM als Passinformation verglichen. Die RMS der Z-Differenzen zwischen DGM und HRSC-Objektpunkten liegen im Bereich von 200 m (Orbit 18: 177 m, Orbit 22: 268 m, Orbit 68: 200 m). Nach der BA unter Nutzung des DGMs als Passinformation reduzieren sich die RMS Z-Differenzen um einen Faktor von 3 (Orbit 18: 84 m, Orbit 22: 56 m, Orbit 68: 63 m). Aufgrund dessen war die Anpassung der HRSC-Daten auf das MOLA-Referenzsystem erfolgreich.

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen die Effizienz der Ansätze der Bildzuordnung und der BA mit dem MOLA DGM als Passinformation zur Verbesserung der äußeren Orientierung. Die Verknüpfungspunkte waren im Allgemeinen mit einer ausreichenden Anzahl von 3-Strahlpunkten gleichmäßig über den ganzen Bildstreifen verteilt. Es wurde eine Genauigkeit von 0.4 Pixel in der Lage und 0.8 Pixel in der Höhe erreicht. Eine signifikante Verbesserung der Positionsparameter der äußeren Orientierung von einer gegebenen a priori Genauigkeit von 1000 m auf weniger als 20 m (bzw. bei Orbit 22 etwas mehr) in allen drei Koordinatenrichtungen (Tab. 2) wurde erzielt. Auch die Genauigkeit der Lage verbesserte sich von 28 mgon auf 1-2 mgon in allen drei Drehwinkeln. Somit kann die Position und die Lage um einen durchschnittlichen Faktor von 30 bis 50 verbessert werden. Durch diese Steigerung der Genauigkeit der Parameter der äußeren Orientierung der HRSC wurde eine substantielle Genauigkeitssteigerung der Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte und gleichzeitig eine hohe Konsistenz zwischen HRSC Punkten und MOLA DGM erreicht, welches das gültige Referenzsystem auf dem Mars darstellt.

5 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., SCHOLTEN, F., EBNER, H., HEIPKE, C., NEUKUM, G., 1993: Two camera experiments on the Mars 94/96 missions, *Geo-Informations-Systeme* (6) 4, S. 11-16.
- BRAND, R., OHLHOF, T., STEPHANI, M., 1997: Processing of 3-line imagery on a digital photogrammetric workstation, McKeown, Jr., D., M., McGlone, J. C., Jamet O. (HRSG.): *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III*, (3072), Proceedings of SPIE, Orlando, Florida, S. 2-10.
- BRAND, R., HEIPKE, C., 1998: A system for automatic aerial triangulation, *IntArchPhRS* (32) 2, S. 27-32.
- EBNER, H., KORNUS, W., OHLHOF, T., 1994: A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model, *Geo-Informations-Systeme* (7) 1, S. 11-16.
- FISCHLER, M.A., BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM* (24) 6, S. 381-395.
- FÖRSTNER, W., 1986: A feature based correspondence algorithm for image matching, *IntArchPhRS* (26) 3/3, S. 150-166.

- HEIPKE, C., SCHMIDT, R., BRAND, R., OBERST, J., NEUKUM, G. AND THE HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM, 2004: Performance of automatic tie point extraction using HRSC imagery of the Mars Express mission, *IntArchPhRS* (35).
- HOFMANN, O., NAVÉ, P., EBNER, H., 1982: DPS – A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery, *IntArchPhRS* (24) 3, S. 216-227.
- KRUPNIK, A., 1994: Multiple-patch matching in the object space for aerotriangulation, Technical Report 428, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.
- NEUMANN, G.A., LEMOINE, F.G., SMITH, D.E., ZUBER, M.T., 2003: The Mars Obiter Laser Altimeter archive: Final precision experiment data record release and status of radiometry, *Lunar Planet. Sci. XXXIV*, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- SCHMIDT, R., BRAND, R., 2003: Automatic determination of tie points for HRSC on Mars Express, *ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003*, October 6-8, Hannover.
- SPIEGEL, M., BAUMGARTNER, A., EBNER, H., 2003: Orientation of Mars Express/HRSC imagery using laser altimeter data as control information, *ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003*, October 6-8, Hannover.
- TANG, L., HEIPKE, C., 2003: Automatic relative orientation of aerial images, *PE&RS* (62) 1, S. 47-55.

6 Danksagung

Diese Arbeit wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter den Förderkennzeichen 50 QM 0103 und 50 QM 0104 gefördert.