DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 610

Michael Spiegel

Kombinierte Ausgleichung der Mars Express HRSC Zeilenbilddaten und des Mars Global Surveyor MOLA DGM

München 2007

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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5049-5 (3 7696 5049 2)

DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 610

Kombinierte Ausgleichung der Mars Express HRSC Zeilenbilddaten und des Mars Global Surveyor MOLA DGM

Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing.Univ. Michael Spiegel

München 2007

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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5049-5 (3 7696 5049 2)

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

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

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

e-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. Dr.-techn.E.h. R. Rummel

Prüfer der Dissertation:
1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. H. Ebner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chr. Heipke, Leibniz Universität Hannover
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Stilla

Die Dissertation wurde am 23.04.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 25.06.2007 angenommen.

© 2007 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5049-5 (3 7696 5049 2)

Zusammenfassung

Die Mars Express Mission mit der High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord begann im Januar 2004 ihre Aufnahmephase. Während der ersten drei Jahre wurden 1200 Bildstreifen erfasst, die mittels photogrammetrischer Punktbestimmung ausgewertet werden können.

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der äußeren Orientierung der HRSC unter Verwendung von Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) Daten als Passinformation in einer kombinierten Ausgleichung. In dieser Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung werden die Parameter der äußeren Orientierung nur an wenigen ausgewählten Orientierungspunkten entlang des Orbits geschätzt. Das mathematische Modell der photogrammetrischen Punktbestimmung basiert auf den bekannten Kollinearitätsgleichungen. Diese Gleichungen beschreiben den elementaren geometrischen Zusammenhang zwischen Bild- und Objektraum. Zusätzliche Passinformation ist notwendig, um die photogrammetrisch abgeleiteten Objektpunkte in ein bereits vorhandenes Referenzsystem einzupassen. Am Mars sind nur wenige genau bekannte Punkte vorhanden, welche als klassische Passpunkte dienen könnten. Allerdings ist ein digitales Geländemodell (DGM) verfügbar, welches aus einer großen Anzahl von MOLA Messungen abgeleitet ist. Zur Nutzung dieses MOLA DGMs in der Bündelausgleichung müssen zusätzliche Bedingungen eingeführt werden, um die Beziehung zwischen MOLA DGM und HRSC Objektpunkten herstellen zu können.

Die Eigenschaften und die Genauigkeiten der HRSC Daten werden aufgezeigt und ein Auswertekonzept für Einzelstreifen und Blöcke basierend auf dem Ausgleichungsmodell entwickelt. An mehreren Streifen werden Varianten des Modells untersucht und eine Modellvariante herausgearbeitet, mit der die besten Ergebnisse erzielt werden können. Mit dieser Modellvariante werden alle 1200 verfügbaren Bildstreifen ausgeglichen. In 82 Prozent der Fälle werden damit gute Ergebnisse erzielt und verbesserte äußere Orientierungen zur Verfügung gestellt. Die Ausgleichung von nebeneinander liegenden Einzelstreifen als Block zeigt, dass im Gegensatz zu Einzelstreifen noch bessere Ergebnisse erzielt werden können. Mit dem Verfahren wird somit eine hohe Konsistenz zwischen HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM erzielt, welches das derzeit gültige Referenzsystem am Mars bildet. Zusätzlich werden die Parameter der inneren Orientierung in einer simultanen Ausgleichung geschätzt. Mit der verbesserten äußeren Orientierung können hochwertige photogrammetrische Produkte wie DGMs, Orthophotomosaike und topographische Karten aus den Bildern abgeleitet werden.

Summary

The Mars Express Mission with the High Resolution Stereo Camera (HRSC) on board started its mapping phase in January 2004. During the first three years 1200 image strips were acquired, which can be analyzed by photogrammetric point determination.

The primary goal of this thesis is to estimate the exterior orientation of HRSC using Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data as control information in a combined adjustment approach. In the Least-Squares-Adjustment the parameters of the exterior orientation are estimated at a few selected orientation points along the orbit only. The mathematical model for photogrammetric point determination is based on the well known collinearity equations. These equations describe the fundamental geometrical condition between image and object space. Additional control information is necessary in order to fit photogrammetrically derived object points into the existing reference system. On Mars there are only few precisely known points which can serve as classical ground control points. But there is a Digital Terrain Model (DTM), derived from a large number of ground points measured by MOLA. Using this MOLA DTM in bundle adjustment, additional constraints are introduced to combine MOLA DTM and the HRSC object points.

The properties and the accuracies of the HRSC data will be shown and a concept for the evaluation of single strips and blocks is developed based on the adjustment model. Different types of the adjustment model will be investigated using several strips. The type of adjustment which yields the best results is proposed for the further processing. With this type of the adjustment model all 1200 available image strips will be adjusted. Within 82 percent good results are achieved and improved exterior orientations are provided. The adjustment of neighboring single strips computed as block yields even better results compared to the adjustment of single strips. Finally, a high consistency between HRSC object points and MOLA DTM (which represents the valid reference system on Mars) can be reached. Additionally, the parameters of interior orientation can be estimated by simultaneous adjustment. With the improved exterior orientation high quality photogrammetric products such as DTMs, ortho-image mosaics, and topographic maps can be derived.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **7**
1.1 Motivation 7
1.2 Planet Mars 7
1.3 Mars Express Mission 7
1.4 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit 8

2 Marsmissionen **10**
2.1 Die Marsmissionen Mariner 9, Viking und Mars 96 12
2.1.1 Mariner 9 12
2.1.2 Viking 12
2.1.3 Mars 96 12
2.2 Mars Global Surveyor (MGS) 14
2.2.1 Bestimmung des MGS Orbits 15
2.2.2 Mars Orbiter Camera (MOC) 15
2.2.3 Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) 16
2.2.4 Mars Relay Communications Experiment 20
2.3 Mars Express (MEX) 20
2.3.1 Ziele, Methoden und Experimente 21
2.3.2 High Resolution Stereo Camera (HRSC) 22
2.3.3 Bahn- und Lagedaten 25
2.4 Gegenüberstellung von HRSC und MOLA Daten 26
2.4.1 Vor- und Nachteile der HRSC Daten 26
2.4.2 Vor- und Nachteile der MOLA Daten 27

3 Bisherige Arbeiten **29**
3.1 Photogrammetrische Punktbestimmung mit Zeilenbilddaten 29
3.1.1 Aufnahmeprinzip 29
3.1.2 Bestimmung homologer Bildpunkte 30
3.1.3 Ausgleichungsmodell 30
3.2 Dreizeilenkameras 31
3.3 Orbitmodellierung mittels Keplerelementen 32
3.4 Passinformation zur Datumsfestlegung 33
3.4.1 Verwendung von Oberflächen als Passinformation 33
3.4.2 Folgerungen 35

4 Kombinierte Ausgleichung von HRSC- und MOLA Daten **36**
4.1 Bildkoordinatensystem 36
4.2 Kollinearitätsgleichungen 37
4.3 Beobachtete Unbekannte 39
4.4 Zusätzliche Differenzen für jedes Zeilenbild 39
4.5 Systematische Effekte in den Parametern der äußeren Orientierung 40
4.5.1 Bahndaten 40
4.5.2 Lagewinkel 42
4.6 Passinformation aus MOLA-Daten 42
4.7 Schätzung der inneren Orientierung 44

5 Schätzung der äußeren Orientierung der HRSC auf MEX . . . 45
5.1 Eigenschaften und Genauigkeit der Daten . . . 45
5.1.1 Bilddaten . . . 45
5.1.2 Bildkoordinaten . . . 49
5.1.3 Äußere Orientierung . . . 50
5.1.4 Innere Orientierung . . . 51
5.1.5 MOLA Passinformation . . . 51
5.1.6 Orientierungspunkte . . . 51
5.2 Auswertekonzept . . . 52
5.2.1 Einzelstreifen . . . 52
5.2.2 Blöcke . . . 54
5.3 Ergebnisse der Bündelausgleichung der Einzelstreifen . . . 55
5.3.1 Grobfehlersuche . . . 56
5.3.2 Untersuchung verschiedener Varianten des Ausgleichungsmodells . . . 57
5.3.3 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Streifen . . . 63
5.3.4 Massendatenauswertung . . . 66
5.4 Ergebnisse der Ausgleichung von Blöcken . . . 68
5.4.1 Äußere Orientierung . . . 68
5.4.2 Genauigkeit der HRSC Objektpunkte . . . 70
5.4.3 Differenz zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM . . . 72
5.5 Konvergenzverhalten der Bündelausgleichung . . . 73
5.6 Abschätzung der Genauigkeit der Bahn . . . 74

6 Simultane Schätzung der inneren und äußeren Orientierung . . . 77
6.1 Restfehler ohne verbesserte innere Orientierung . . . 77
6.2 Physikalischer Aufbau der Kamera . . . 77
6.3 Schätzbarkeit der Parameter der inneren Orientierung ohne DGM . . . 78
6.3.1 Geradeausflug . . . 78
6.3.2 Gekrümmte Bahn . . . 79
6.4 Schätzbarkeit der Parameter der inneren Orientierung mit DGM . . . 82
6.5 Bestimmung eines verbesserten Parametersatzes der inneren Orientierung für 5 Sensoren 82
6.6 Restfehler mit verbessertem Parametersatz . . . 84
6.6.1 Bildkoordinaten aus 5 Sensoren . . . 84
6.6.2 Bildkoordinaten aus 3 Sensoren . . . 87
6.7 Verbesserung der Parameter der inneren Orientierung für die multispektralen Sensoren 87

7 Ergebnisse und Ausblick . . . 90
7.1 Ergebnisse . . . 90
7.2 Ausblick . . . 92

Verzeichnis der Variablen und Abkürzungen . . . 93

Literaturverzeichnis . . . 94

Dank . . . 99

1. Einleitung

1.1 Motivation

In der Photogrammetrie ist es immer von zentraler Bedeutung, die äußere Orientierung von Bildern zu kennen, um aus diesen photogrammetrische Produkte wie Orthophotos, Karten oder digitale Geländemodelle (DGMs) abzuleiten. Im Falle von terrestrischen Luft- oder Satellitenbilddaten kann die äußere Orientierung relativ einfach mit Passpunkten in einer Bündelausgleichung bestimmt werden. Ein anderes Verfahren ist die direkte Georeferenzierung, bei der mit Hilfe von GPS und INS die Parameter der äußeren Orientierung während der Bildaufnahme gemessen werden.

Bei extraterrestrischen Missionen hingegen stehen meist keine oder nur ungenaue Passpunkte zur Verfügung. Auch gibt es bei diesen Missionen kein GPS und kein genaues INS. Dennoch ist es auch bei extraterrestrischen Missionen für alle Experimente äußerst wichtig, genaue Kenntnis über die exakte äußere Orientierung der jeweiligen Raumschiffe zu besitzen, um die Daten korrekt zuordnen zu können. Für die Mars Express Mission werden im konkreten Fall die Bahnparameter und die Lagewinkel von Sternenkameras und Dopplermessungen zu den Raumschiffen bestimmt. Die aus den Messungen gewonnene äußere Orientierung kann mittels photogrammetrischer Punktbestimmung verbessert und an das derzeit auf dem Mars gültige Referenzsystem angepasst werden.

1.2 Planet Mars

Schon seit Jahrtausenden fasziniert die Menschen der Himmelskörper Mars. Am Firmament hebt er sich wegen seiner roten Farbe von anderen Gestirnen ab und findet damit schon frühzeitig Einzug in Sagen und Mythologien alter Weltkulturen. Vor allem taucht er immer wieder wegen seiner roten Färbung im Zusammenhang mit Krieg, Unheil, Krankheit und Tod auf. Besonders bekannt ist er als Kriegsgott aus der römischen und griechischen Mythologie.

Für die Planetenforschung ist der Mars von besonderem Interesse, da er der erdähnlichste Planet unseres Sonnensystems ist, auch wenn er mit einem Radius von 3396 km nur halb so groß ist wie die Erde. Ähnlichkeiten finden sich eher in bahndynamischen Eigenschaften und in der Beschaffenheit. So weist der Mars wie die Erde eine Bahnneigung von ca. 23° auf. Dies führt zu Jahreszeiten, die allerdings, bedingt durch die mit 1,9 Erdjahren fast doppelt so lange Umlaufzeit um die Sonne, länger dauern. Der Marstag ist nur wenige Minuten länger als ein Erdtag.

Den Mars umrunden die Monde Phobos und Deimos. Es gibt Vulkane, Hoch- und Tiefebenen, langgezogene Täler, Einschlagkrater, eisbedeckte Polkappen und Staubstürme. Nur flüssiges Wasser ist auf dem Roten Planeten nicht vorhanden, obwohl geologische Formen auf der Oberfläche darauf schließen lassen, dass dort einmal Wasser geflossen sein muss. Lebensfeindlich ist der Mars aber nicht nur wegen des fehlenden Wassers. Die Atmosphäre besteht nur zu 0,13 % aus Sauerstoff. Der überwiegende Teil setzt sich aus 95,3 % Kohlendioxid, 2,7 % Stickstoff, 1,6 % Argon und anderen gasförmigen Stoffen zusammen. Die Atmosphäre ist im Vergleich zur Erde zudem sehr dünn. Daher schwanken die Temperaturen auf der Oberfläche von -130°C bis 30°C.

1.3 Mars Express Mission

Die Mars Express Mission ist die erste rein europäische, interplanetare Mission und wird von der European Space Agency (ESA) betrieben. Mitte 2003 wurde die Rakete mit dem Orbiter an Bord gestartet und erreichte Weihnachten 2003 den Roten Planeten. Mit an Bord ist, neben anderen wissenschaftlichen Experimenten, die nach dem Dreizeilenprinzip arbeitende High Resolution Stereo Camera (HRSC), die die Marsoberfläche in Stereo und Farbe mit einer Bodenauflösung von bis zu 11 m aufnimmt. Um dieses Ziel zu erreichen, muss sich der Orbiter bis auf 270 km dem Planeten nähern, wofür ein stark elliptischer Orbit notwendig ist.

Die räumliche Auflösung der Marsoberfläche in den Stereobildern übertrifft die bisher von anderen Missionen gesammelten Fernerkundungsdaten bei Weitem. Aus den gewonnenen Daten werden DGMs, Karten und Orthophotos hergestellt, die es Wissenschaftlern erlauben, Details mit einer Größe von 20 bis 30 m dreidimensional zu analysieren.

Ursprünglich war die Missionsdauer auf ein Marsjahr bzw. 23 Erdmonate ausgelegt. Inzwischen wurde von der ESA zweimal eine Verlängerung der Mission mit einer Dauer von insgesamt etwa zwei Marsjahren beschlossen. Dies bedeutet, dass bis Mai 2009 der Orbiter weiter betrieben wird und HRSC Fernerkundungsdaten liefert.

1.4 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, für die Mars Express Mission ein photogrammetrisches Verfahren zur Rekonstruktion der äußeren Orientierung zu entwickeln und großflächig einzusetzen. Dieses soll die Bilddaten der an Bord befindlichen HRSC und das vorhandene Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) DGM als Ersatz für Passpunkte nutzen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine nach dem Kleinste-Quadrate-Prinzip arbeitende Bündelausgleichung entwickelt, mit der sowohl einzelne Streifen als auch ganze Blöcke ausgeglichen werden. Da dieser Ansatz außerdem großflächig eingesetzt werden soll, ist es erforderlich, auch praktische Aspekte zu berücksichtigen. So muss z.B. die Ausgleichung und die anschließende Qualitätskontrolle möglichst automatisch ablaufen.

Ziel bei einem vollautomatisch arbeitenden Verfahren ist es u.a., einen einzigen Eingangsparametersatz für die Bündelausgleichung zur Verfügung zu stellen, der für möglichst viele Streifen gute Ergebnisse liefert. Daher werden verschiedene Parametersätze eingehend untersucht. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es außerdem wichtig, die Fälle, bei denen Besonderheiten auftreten, und infolge dessen die automatischen Verfahren nicht greifen, eingehender zu untersuchen. Für diese Streifen ist es notwendig, den Grund für eine nicht erfolgreiche Ausgleichung zu ermitteln, oder, im Extremfall, nur für diesen Spezialfall einen eigenen Eingangsparametersatz zu entwickeln.

In Kapitel 2 wird auf verschiedene Marsmissionen eingegangen, die entweder für die photogrammetrische Auswertung von Bildern der Marsoberfläche oder für die vorliegende Arbeit von grundlegender Bedeutung sind. Für die Mars Global Surveyor Mission und die Mars Express Mission wird auf die erzielten Ergebnisse und deren Genauigkeiten näher eingegangen.

Ein Überblick über die bisherigen Arbeiten zur photogrammetrischen Punktbestimmung mit Dreizeilenkameras und die Verwendung von allgemeiner Passinformation auf Erde und Mars wird in Kapitel 3 gegeben. Auch werden Stärken und Schwächen der Ansätze in Bezug auf das zu entwickelnde eigene Verfahren herausgearbeitet.

In Kapitel 4 wird das Ausgleichungsmodell für die kombinierte Ausgleichung mit HRSC- und MOLA Daten entwickelt. Es wird untersucht, welche Parameter der äußeren Orientierung für mindestens vier Orientierungspunkte bestimmt werden können. Schließlich wird auf die Anpassung der HRSC Bilddaten an die MOLA Daten eingegangen und es werden hierfür die zusätzlichen Beobachtungsgleichungen für die Bündelausgleichung angegeben.

Zu Beginn von Kapitel 5 werden die Eigenschaften und die Genauigkeiten der HRSC Daten aufgezeigt und ein Auswertekonzept für Einzelstreifen und Blöcke basierend auf dem Ausgleichungsmodell entwickelt. An mehr oder weniger zufällig ausgewählten Streifen werden Varianten des Modells untersucht und es wird eine Modellvariante herausgearbeitet, mit der die besten Ergebnisse erzielt werden können. Diese Modellvariante wird auf Massendaten angewandt. In vielen Fällen werden damit gute Ergebnisse erzielt. Die Ausgleichung von nebeneinander liegenden Einzelstreifen als Block zeigt, dass erwartungsgemäß im Gegensatz zu Einzelstreifen noch bessere Ergebnisse erzielt werden können. Das Kapitel schließt mit einer Untersuchung des Konvergenzverhaltens der Ausgleichung und einer Abschätzung der Genauigkeit der Bahn.

In Kapitel 6 wird die innere Orientierung simultan mit den Parametern der äußeren Orientierung geschätzt, wobei zunächst untersucht wird, welche Parameter der inneren Orientierung überhaupt schätzbar sind. In einer großen Anzahl Streifen werden die Parameter der inneren Orientierung zunächst für die panchromatischen Sensoren bestimmt und daraus ein einziger Satz an verbesserten Parametern der inneren Orientierung berechnet. Schließlich werden mit dem gleichen Verfahren die Parameter der inneren Orientierung der multispektralen Sensoren geschätzt.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenstellung der entwickelten Verfahren und erzielten Ergebnisse. In einem Ausblick werden Vorschläge für weiterführende Arbeiten unterbreitet.

2. Marsmissionen

Im 16. Jahrhundert begannen Forscher, sich nicht nur mit dem Planeten Erde zu beschäftigen, sondern auch andere Himmelskörper zu untersuchen. Insbesondere der Mars ist seit dieser Zeit ein Objekt der Faszination. So entdeckte Nikolaus Kopernikus (1473-1543) als erster die Bewegung des Mars. Johannes Kepler (1561-1630) untersuchte Anfang des 17. Jahrhunderts die Gesetzmäßigkeiten, mit denen sich die Himmelskörper bewegen und beschrieb damit die Bahnen der Planeten um die Sonne. Im gleichen Zeitraum machte Galileo Galilei (1564-1642) die ersten Teleskopbeobachtungen des Planeten Mars. Diese Arbeiten führte Dominique Cassini (1625-1712) in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts fort und entdeckte die eisbedeckten Pole des Mars. Der Durchmesser wurde durch William Herschel (1738-1822) im 18. Jahrhundert erstmalig bestimmt. Die genaueste Karte des Mars vor dem Raumflugzeitalter entstand durch Eugène Antoniadi (1877-1944) in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (KIFFER et al., 1992).

Nachdem in der Mitte des 20. Jahrhunderts Raketen kontrolliert die Erdanziehungskraft verlassen konnten, unternahmen ab 1960 zuerst die UdSSR, einige Jahre später die USA, Versuche, den Mars mit Raumschiffen zu erreichen, um ihn aus der Nähe zu erforschen. Anfangs zeichneten sich die Missionen eher durch Fehlschläge aus. Vor allem die Missionen der UdSSR waren von Misserfolgen gekennzeichnet. Die ersten Erfolge konnten die USA verbuchen. Sie waren es, denen mit der Mission Mariner 4 (1965) der erste Marsvorbeiflug gelang, bei dem eine Raumsonde Bilder der Marsoberfläche zur Erde übermittelte. Auch brachten die USA mit Mariner 9 (1971) den ersten Orbiter in die Umlaufbahn des Planeten. Mit der Zwillingsmission Viking 1 & 2 (1976) konnten die ersten Landeeinheiten erfolgreich auf der Marsoberfläche abgesetzt werden. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Projekte und deren Ergebnisse. Im weiteren Kapitel wird auf frühere Missionen eingegangen, sofern sie für die photogrammetrische Erforschung des Mars und im Rahmen der Mars Express Mission von Bedeutung sind.

Start	Projekt	Land	Ergebnisse
10.10.1960	Marsnik-1	UdSSR	Explodiert vor Erreichen der Erdumlaufbahn.
14.10.1960	Marsnik-2	UdSSR	Explodiert vor Erreichen der Erdumlaufbahn.
24.10.1960	Sputnik 29	UdSSR	Explodiert in der Erdumlaufbahn.
01.11.1962	Mars 1	UdSSR	Nach Kommunikationsproblemen Vorbeiflug am Mars in 200000 km Entfernung.
04.11.1962	Sputnik 31	UdSSR	Geht in der Erdumlaufbahn verloren.
05.11.1964	Mariner 3	USA	Schlägt nach dem Start falsche Richtung ein.
28.11.1964	Mariner 4	USA	Erste Bilder vom Mars.
30.11.1964	Zond 2	UdSSR	Kommunikation versagt.
18.07.1965	Zond 3	UdSSR	Konnte erst gestartet werden, als der Mars nicht mehr erreichbar war und wurde daher zur Mondsonde.
24.02.1969	Mariner 6	USA	Passiert Mars in 3215 km Entfernung und sendet Bilder des Planeten.
27.03.1969	Mariner 7	USA	Passiert Mars in 3516 km Entfernung und sendet Bilder des Planeten.
27.03.1969	Mars 1969A	UdSSR	Die Zündung der dritten Stufe der Protonrakete schlägt fehl.
02.04.1969	Mars 1969B	UdSSR	Schlägt aufgrund einer technischen Störung kurz nach dem Zünden der ersten Raketenstufe fehl.
08.05.1971	Mariner 8	USA	Erreicht die Umlaufbahn nicht.
10.05.1971	Cosmos 419	UdSSR	Die Abtrennung der vierten Stufe in der Erdumlaufbahn schlägt fehl.
19.05.1971	Mars 2	UdSSR	Zweite Raumsonde, die den Mars umfliegt. Das Landefahrzeug wurde beim Aufprall zerstört.

Fortsetzung nächste Seite ...

... Fortsetzung

Start	Projekt	Land	Ergebnisse
28.05.1971	Mars 3	UdSSR	Dritte Raumsonde, die den Mars umfliegt. Der Lander sendet nach der Landung 20 Sekunden Signale.
30.05.1971	Mariner 9	USA	Erste Raumsonde, die den Mars umfliegt. Nimmt mehr als 7000 Bilder der Planetenoberfläche auf.
21.07.1973	Mars 4	UdSSR	Durch weitgehenden Ausfall der Elektronik konnte das Triebwerk nicht gezündet werden und Mars 4 passiert den Planeten in einer Entfernung von 9846 km.
25.07.1973	Mars 5	UdSSR	Arbeitet 9 Tage in der Umlaufbahn und sendet 60 Bilder.
05.08.1973	Mars 6	UdSSR	Der Lander misst ein Atmosphärenprofil, während er an Höhe verliert und überträgt die Daten an die Sonde in der Umlaufbahn. Er stürzt jedoch auf die Oberfläche.
09.08.1973	Mars 7	UdSSR	Der Lander verfehlt den Planeten.
20.08.1975	Viking 1	USA	Die ersten Messungen auf der Oberfläche. Erfolgreiche Messperiode dauert mehrere Jahre.
09.09.1975	Viking 2	USA	Die erfolgreiche Messperiode des Landers dauert mehrere Jahre.
07.07.1988	Phobos 1	UdSSR	Kommunikation bricht auf dem Weg zum Mars ab.
12.07.1988	Phobos 2	UdSSR	Kontakt geht verloren, als die Raumsonde Bilder vom Marsmond Phobos aufnimmt.
25.09.1992	Mars Observer	USA	Kontakt am 21. August 1993 verloren.
16.11.1996	Mars 96	RUS/D	Das Raumschiff verglüht in der Erdumlaufbahn, da eine Raketenstufe nicht zündet.
07.11.1996	Mars Global Surveyor	USA	Die Mission verläuft sehr erfolgreich und wird mehrmals verlängert. Seit dem 2. November 2006 ist allerdings der Kontakt zur Sonde abgebrochen.
04.12.1996	Mars Pathfinder	USA	Nimmt über 16000 Bilder der Oberfläche auf.
04.07.1998	Nozomi	Japan	Geht wegen Manövrierunfähigkeit (Treibstoffmangel) im Dezember 2003 verloren.
11.12.1998	Mars Climate Orbiter	USA	Geht am 23. Sept. 1999 kurz vor dem Einschuss in die Umlaufbahn verloren.
03.01.1999	Mars Polar Lander	USA	Landemanöver Anfang Dez. 1999 schlägt aus ungeklärten Gründen fehl.
07.04.2001	Mars Odyssey	USA	Erfolgreicher Orbiter, detaillierte Kartierungen und mineralogische Untersuchungen. Dient als Relaisstation für zukünftige Landemissionen.
02.06.2003	Mars Express	Europa	Erste europäische Mission. Der Orbiter ist erfolgreich, während der Lander verloren geht.
05.06.2003	Mars Exploration Rover 1	USA	Landung am 4. Jan. 2004 im Gusev Krater. Der Rover arbeitet nach 1,5 Marsjahren immer noch und hat inzwischen eine Strecke von 6,5 km zurückgelegt.
25.06.2003	Mars Exploration Rover 2	USA	Landung am 25. Jan. 2004 in der Ebene Meridiani Planum. Der Rover arbeitet nach 1,5 Marsjahren immer noch und hat inzwischen eine Strecke von 8,2 km zurückgelegt.
12.08.2005	Mars Reconnaissance Orbiter	USA	Schwenkt am 10. März 2006 in die Umlaufbahn des Mars ein. Die Instrumente arbeiten seither erfolgreich.

Tabelle 2.1. : Marsmission

2.1 Die Marsmissionen Mariner 9, Viking und Mars 96

Aus der Fülle der im vorangegangenen Abschnitt erwähnten Missionen werden im Folgenden die Missionen Mariner 9, Viking 1 & 2 und Mars 96 ausführlicher beschrieben, da diese aus photogrammetrischer Sicht für die Erforschung des Mars von großer Bedeutung sind.

2.1.1 Mariner 9

Mariner 9 war die erste Raumsonde überhaupt, die in den Marsorbit eingebracht wurde. An Bord dieses Orbiters waren zwei Kameras, die Bilder mit je 832 x 700 Pixeln lieferten und während 349 Tagen die ganze Oberfläche mit mehr als 7000 Bildern abdeckten. Stereophotogrammetrie konnte jedoch nur mit Bildern aus verschiedenen Orbits betrieben werden, da bei der Missionsplanung photogrammetrische Aspekte nicht berücksichtigt worden waren. Erschwerend kam hinzu, dass die Stereobildpaare aus verschiedenen Flughöhen stammten, oft unterschiedliche Belichtungsverhältnisse aufwiesen und teilweise sehr unterschiedlich verzerrt waren (Levinthal et al., 1973). Die Auswertung der Stereomodelle erfolgte mit analytischen Stereoplottern. Auf Basis der so gemessenen Daten wurde das erste Passpunktnetz auf dem Mars erstellt.

2.1.2 Viking

Das Viking Projekt bestand aus zwei baugleichen Raumschiffen (Viking 1 & 2), die im Jahr 1975 kurz hintereinander zum Mars gestartet wurden. Primäres Ziel der Missionen war es, auf dem Nachbarplaneten zu landen und die Oberfläche wissenschaftlich zu erforschen, wobei besonderer Wert auf die Suche nach Wasser und Leben gelegt wurde. Jedes der Raumschiffe bestand aus einem Orbiter mit vier Instrumenten und einem nicht fahrbaren Lander mit neun Instrumenten. Während der gesamten Mission wurden von den Instrumenten der Orbiter und den Landern mehr Daten aufgezeichnet, als von allen vorherigen Marsmissionen zusammen. Die Daten finden bis heute Verwendung in der Wissenschaft.

Von photogrammetrischer Bedeutung sind die zwei auf dem Orbiter befindlichen Vidicon-Kameras. Hierbei handelte es sich um hochauflösende Flächenkameras (1056 x 1182 Pixel) mit 475 mm Brennweite und einem Objektivdurchmesser von 37 mm (Snyder, 1977). Mit den Kameras beider Orbiter wurden etwa 50000 Bilder aufgenommenen, die den Mars mit einer Bodenauflösung von 300 m/Pixel und besser abdecken. Die Mehrheit der Bilder hat sogar eine Bodenauflösung von 40 – 50 m/Pixel. Hierunter befinden sich etwa 4000 Stereobildpaare, die die gesamte Planetenoberfläche abdecken. Mit diesen konnte die Topographie des Mars erstmals flächenhaft erfasst werden. Wegen der geringen Konvergenzwinkel zwischen den Kameras beträgt die Höhengenauigkeit jedoch lediglich einige Kilometer (Wu und Schafer, 1984).

Begünstigt durch gute Bedingungen (Flughöhe im Perizentrum niedrig, die Entfernung Erde Mars gering, wenig Sonnenwinde, gute Geometrie zwischen Orbit und Erde) wurde von Oktober 1977 bis März 1978 mit Dopplermessungen von der Erde zum Viking 2 Orbiter das Schwerefeld des Mars bis Grad und Ordnung vier bestimmt (Sjogren, 1979). Ein weiteres Modell des Schwerefelds in sphärisch-harmonischer Darstellung bis Grad und Ordnung 18 wurde am Ende der Viking Missionen mit allen verfügbaren Dopplermessungen aus Mariner 9 und Viking 1 & 2 generiert (Balmino et al., 1982).

Zur systematischen Kartierung der Oberfläche wurden aus den Daten der Viking Missionen das RAND-Passpunktnetz (Davies, 1978) und das USGS-Passpunktnetz erstellt (Wu und Schafer, 1984). Verwendung fanden die Daten ebenfalls bei einer Neuausgleichung des globalen Passpunktnetzes mit einem strengen photogrammetrischen Ansatz (Zeitler, 1999).

2.1.3 Mars 96

Im Oktober 1994 sollte die erste zum russischen Projekt Mars 94/96 gehörende Raumsonde vom Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan starten. Wegen Verzögerungen beim Bau des Orbiters, vor allem wegen fehlender finanzieller Mittel, war dieser Starttermin schon bald nicht mehr haltbar. Aus dem

ganzen Programm Mars 94/96, welches ursprünglich mehrere Raumsonden umfasste, blieb schließlich nur Mars 96 übrig und das nur wegen der großen internationalen Beteiligung an dem Projekt.

An Bord befanden sich auch die extra für diese Mission neu entwickelten High Resolution Stereo Camera (HRSC) und der Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner (WAOSS). Beide Instrumente sollten Bilder mit hoher geometrischer Bodenauflösung liefern.

2.1.3.1 Ziele

Die Ziele der wissenschaftlichen Untersuchungen der Mars 96 Mission waren die Kartierung der Oberfläche, die Erforschung der Marsatmosphäre und des Marsinnneren. Um die Entwicklung des Planeten nachvollziehen zu können und auf zukünftige Veränderungen der Erde schließen zu können, war es notwendig, mit unterschiedlichen Instrumenten Kenntnisse über die physikalischen und chemischen Prozesse zu gewinnen.

2.1.3.2 Instrumente

Um diese hochgesteckten Ziele zu erreichen, führte das Raumschiff verschiedene Instrumente an Bord mit. Ebenfalls sollten zwei Lander und zwei Penetratoren auf der Oberfläche des Mars abgesetzt werden. Die zahlreichen Experimente an Bord des Orbiters können in drei Kategorien unterteilt werden (Space Research Institute – Russian Academy of Sciences, 1992):

- Konzipiert für die Aufnahme der Marsoberfläche und der Atmosphäre waren HRSC (Hochauflösende Stereokamera), WAOSS (Kamera für Weitwinkelaufnahmen), OMEGA (Abbildendes Spektrometer im sichtbaren und IR Bereich), PFS (Spektrometer für weiten Spektralbereich), TERMOSCAN (Abbildendes Radiometer), SVET (Abbildendes Spektrometer), SPICAM (Spektrometer im IR- und UV-Bereich), UVMS-M (UV Spektrometer), LWR (Langwelliges Radar), PHOTON (Gammastrahlenspektrometer), NEUTRON-S (Neutronenspektrometer) und MAK (Quadropol-Massenspektrometer).
- Für die Untersuchung des Plasmas waren ASPERA-S (Messung von Partikeln in der Atmosphäre), FONEMA (Analysator für Ionenenergien), DYMIO (Elektrostatischer Analysator und ein Magnetometer), MARIPROB (Messung des kalten Plasmas in der Ionosphäre), MAREMF (Suchkeulenmagnetometer) und SLED-2 (Teilchendetektor für Ionen und Elektronen) vorgesehen.
- Astrophysikalische Experimente waren PGS (Messung von Gammastrahlung), LILAS-2 (Detektion von Gammastrahlenquellen mit hoher Auflösung), EVRIS (Sternoszillationsphotometer), SOYA (Oszillation der Sonne durch Messung der solaren Helligkeit), RADIUS-M (Messung der Strahlendosis während der Reise zum Mars und am Mars).

Die Instrumente HRSC, WAOSS, OMEGA und eine Navigationskamera waren auf der ARGUS Plattform installiert, die unabhängig vom Raumschiff frei bewegt werden konnte. Während der Aufnahme sollte die Plattform so nachgeführt werden, dass die Blickrichtung der Instrumente immer senkrecht zur Marsoberfläche orientiert war.

2.1.3.3 HRSC und WAOSS

Die HRSC und der WAOSS sind Fernerkundungssensoren und arbeiten beide nach dem Aufnahmeprinzip einer Dreizeilenkamera, welches in den Abschnitten 2.3.2.2 und 3.1.1 genauer beschrieben wird. Der wesentliche Unterschied zwischen den Instrumenten besteht in der Auflösung am Boden und in den Stereowinkeln. Im Perizentrum des Orbits wird von der HRSC ein ca. 60 km breites Gebiet mit einer geometrischen Auflösung von 10 m abgedeckt, während WAOSS mit ihren drei panchromatischen Kanälen in der Lage ist, lange Streifen mit einer Breite von 500 km und 80 m Bodenauflösung aufzunehmen (Albertz et al., 1993). Mit beiden Kameras sollten Stereo-Bilddaten aufgezeichnet und

daraus detaillierte DGMs und Orthobilder erstellt werden. Während mit den Daten der HRSC eher kleinräumige morphologische Strukturen, geologische Prozesse und Wechselwirkungen zwischen der Planetenoberfläche und der Atmosphäre untersucht werden sollten, sollten die WAOSS-Daten u.a. dazu dienen, großräumige Phänomene der Atmosphäre und der Marsoberfläche besser interpretieren zu können.

2.1.3.4 Start

Am 16. November 1996 startete Mars 96 mit einer Proton Trägerrakete zunächst erfolgreich. Das Zünden der letzten Trägerstufe verlief aber nicht wie geplant, denn die Rakete gelangte nicht auf einen Fluchtkurs zum Mars, sondern blieb weiter im Erdorbit. Kurze Zeit später trennte sich der Orbiter automatisch von der defekten Stufe und zündete die eigenen Triebwerke, um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Durch dieses Manöver gelangte der Orbiter aber auf eine niedrigere Erdumlaufbahn und wurde in den folgenden Stunden von der Erdatmosphäre so stark abgebremst, dass er einen Tag später in den Pazifik nahe der südamerikanischen Küste stürze. Die Suche nach Teilen des Orbiters in der nahe gelegenen Atacamawüste in Chile, insbesondere nach den vier Plutoniumbatterien der Lander, blieb erfolglos.

2.2 Mars Global Surveyor (MGS)

Das Mars Global Surveyor (MGS) Raumschiff wurde am 7. November 1996 mit einer Delta II Rakete von Cape Canaveral (Florida, USA) gestartet und wird gemeinsam von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und dem Jet Propulsion Laboratory (JPL) des California Institute of Technology betrieben. Die Sonde (siehe Abbildung 2.1) ist eine abgespeckte Nachfolgemission der im Jahr 1993 beim Einschuss in die Marsumlaufbahn verloren gegangenen Sonde Mars Observer und besteht überwiegend aus noch vorhandenen Ersatzteilen dieser Mission. Mit an Bord ist der optische Fernerkundungssensor Mars Orbiter Camera (MOC), das Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), ein Magnetometer/Electron Reflectometer, ein Thermal Emission Spectrometer und das Mars Relay Communications Experiment. Zwei weitere schwere Instrumente von Mars Observer konnten aus Gewichtsgründen nicht mitgeführt werden.

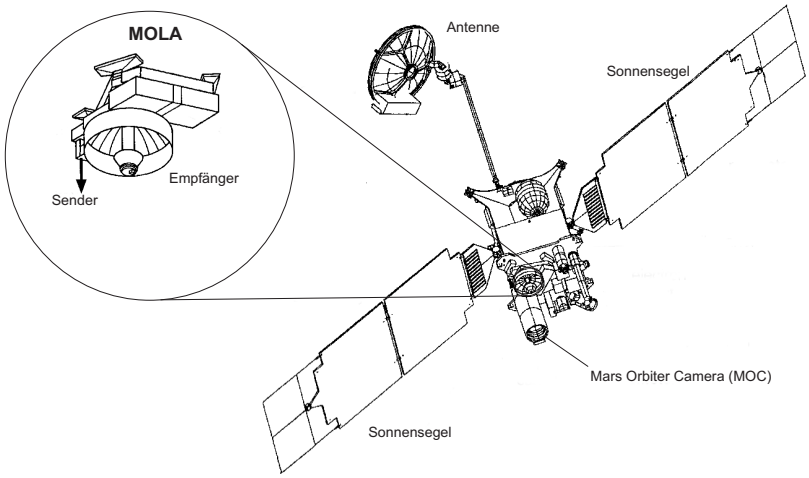


Abbildung 2.1. Mars Global Surveyor und Mars Orbiter Laser Altimeter

Auch bei dieser Mission verlief nicht alles planmäßig: nach dem erfolgreichen Start konnte eines der Sonnensegel nicht vollständig entfaltet werden. Noch während des Flugs zum Mars wurden umfangreiche Untersuchungen über die Auswirkung dieses Problems angestellt mit dem Ergebnis, dass das Sonnensegel trotzdem die volle Energie lieferte. Die Aerobrakingphase wurde wie geplant eingeleitet,

weil man hoffte, das Sonnensegel würde sich bei diesem Abbremsmanöver vollständig entfalten. Dies funktionierte nicht wie gewünscht. Deshalb musste während des Aerobrakings der Orbit mehrmals geändert werden, um die Mission nicht zu gefährden. Der endgültige, nur gering elliptische Orbit mit Flughöhen über der Marsoberfläche von 370 – 430 km wurde daher nicht wie geplant nach vier Monaten, sondern erst nach über einem Jahr erreicht.

2.2.1 Bestimmung des MGS Orbits

Die Bahn des Orbiters wird durch direkte Messungen vom Deep Space Network (DSN) mit Dopplermessungen zur Antenne des Orbiters bestimmt. Diese war bis zum Ende des Aerobrakings fest mit dem Orbiter verbunden. Während des Betriebs der Instrumente musste der Orbiter zur Marsoberfläche gedreht werden und die mit dem Orbiter fest verbundene Antenne konnte nicht zur Erde hin ausgerichtet werden. Daher konnten keine Dopplermessungen durchgeführt werden und die Bahn musste für diese Zeiträume interpoliert werden. Seit der vollen Inbetriebnahme der Antenne hängt diese frei beweglich an einem Ausleger des Orbiters und wird während des Betriebs der Instrumente zeitgleich mit diesen betrieben. Hierbei wird die Antenne kontinuierlich nachgeführt, wodurch wiederum die Bestimmung des Orbits erschwert wird. Beim Vergleich von MOLA Profilen (siehe Abschnitt 2.2.3.4) in Gebieten, in denen sich mehrere Orbits kreuzen und die Marsoberfläche große Höhenunterschiede aufweist (z.B. Krater), ergaben sich in radialer Richtung Differenzen zwischen den Orbits von typischerweise weniger als 1 m. Entlang der und quer zur Flugrichtung liegen diese Verschiebungen normalerweise bei weniger als 10 m. Durch diese Vergleiche sind nicht nur Genauigkeitsabschätzungen für die Bahnen möglich, sondern es wurden ebenfalls grob fehlerhafte Orbitbahnen detektiert (Lemoine et al., 1999; Neumann et al., 2001).

Die Modellierung und die Genauigkeit der Lagewinkel müssen für verschiedene Situationen separat betrachtet werden. Bis zum Ende des Aerobrakings, d.h. solange die Antenne noch fest mit dem Orbiter verbunden war, konnten für die Aufnahmezeiträume die Daten der Lagewinkel nicht zur Erde übertragen werden. Für kurze Aufnahmezyklen war eine Interpolation der fehlenden Lagewinkel problemlos möglich. Wurden während der Aufnahme die Sonnensegel gedreht, so war die Interpolation, wegen der dadurch wirkenden Kräfte auf das Raumschiff und damit plötzlichen Veränderungen der Lagewinkel, schwieriger. Seit dem Zeitpunkt der vollen Inbetriebnahme der Antenne konnten die gemessenen Daten kontinuierlich zur Erde übertragen werden. Die Genauigkeit der Lagewinkel für den regulären Mappingbetrieb, d.h. mit am Ausleger hängender Antenne, liegt bei 1 – 3 mrad. Dies entspricht bei einer Flughöhe von 400 km am Marsboden 400 – 1200 m.

2.2.2 Mars Orbiter Camera (MOC)

Die Mars Orbiter Camera (MOC) besteht aus zwei Weitwinkelkameras und einer hochauflösenden Schmalwinkelkamera. Während die Weitwinkelkameras für tägliche Übersichtsaufnahmen mit einer maximalen Bodenauflösung von 250 m/Pixel bestimmt sind, hat die hochauflösende Kamera eine Bodenauflösung von 1,4 m/Pixel und soll vor allem Bereiche des Mars aufnehmen, die aufgrund von Viking Aufnahmen interessant erscheinen. Eine globale Abdeckung wird mit der Schmalwinkelkamera nicht erreicht. Die Sensoren aller drei Kameras sind einzelne Charge Coupled Device (CCD) Zeilen, die nach dem Push-Broom Prinzip arbeiten, d.h. das ganze Bild setzt sich aus einzelnen Zeilen-Aufnahmen zusammen, die beim Überflug über das Gelände nacheinander aufgenommen werden (Malin et al., 1991; Malin und Edgett, 2001).

Die Weitwinkelkameras unterscheiden sich nur durch die Spektralfilter. Eine Kamera ist für den blauen, die andere für den roten Spektralbereich ausgelegt. Sie bestehen aus je 3456 Pixeln mit einer Pixelgröße von 7 μm und können eine komplette Umrundung des Mars mit einer Bodenauflösung von 7,5 x 7,5 km^2/Pixel aufnehmen. Die hochauflösende Kamera hat 2048 Pixel mit einer Pixelgröße von 13 μm. Die Streifenbreite, d.h. die Abdeckung auf dem Boden quer zur Flugrichtung beträgt bei einer Auflösung von 1,4 m/Pixel 2,9 km. Entlang der Flugrichtung kann ein Gebiet von maximal 25,2 km aufgenommen werden.

Stereoszenen sind mit diesen Kameras aufgrund der Bauweise nur aus Bildern verschiedener Orbits möglich. Normalerweise werden während der Mission keine Stereoszenen systematisch aufgenommen, und so müssen Bilder zu Stereoszenen kombiniert werden, die zufällig dasselbe Gebiet aus unterschiedlichen Blickwinkeln abbilden. Ein Nachteil bei diesen Stereoszenen ist, dass die Aufnahmezeitpunkte der Bilder zum Teil weit auseinander liegen (Caplinger und Malin, 2001).

2.2.3 Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)

Das MOLA Experiment (siehe Abbildung 2.2) wurde vom NASA Goddard Space Flight Center (NASA GSFC) mit Unterstützung vom Goddard's Engineering Systems Analysis Branch ursprünglich für die gescheiterte Mars Observer Mission entwickelt (Zuber et al., 1992). Für die Ersatzmission Mars Global Surveyor wurde MOLA modifiziert und weiterentwickelt. Dies war im Wesentlichen eine Verbesserung des Lasers in Bezug auf die Auflösung der Entfernungsmessung.

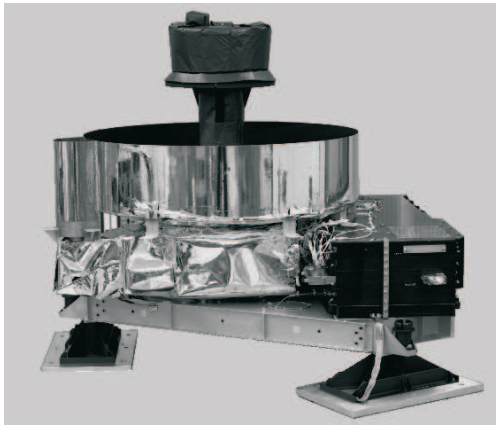


Abbildung 2.2. Mars Orbiter Laser Altimeter

Während der langen Aerobrakingphase (Nov. 1997 - Feb. 1999) war MOLA nur zeitweise in Betrieb. Erst mit Erreichen des in 400 km Höhe liegenden Beobachtungsorbits Ende Februar 1999 wurde MOLA kontinuierlich betrieben. Ausgeschaltet wurde MOLA nur während einer zwei Monate dauernden Phase von Juni bis August 2000, als die Sonne zwischen Mars und Erde stand und somit kein Funkkontakt vom Raumschiff zur Erde möglich war. Im Juni 2001 mussten die MOLA Abstandsmessungen aufgrund eines Fehlers im Laser eingestellt werden. Während des gesamten Messzeitraums von 1,25 Marsjahren wurden mehr als 640 Millionen Einzelmessungen zwischen 88° nördlicher bzw. -88° südlicher Breite gemacht. Die auf Basis der Einzelmessungen gewonnenen Folgeprodukte gelten derzeit als „das Referenzsystem" auf dem Mars.

2.2.3.1 Ziele des MOLA Experiments

Das Primärziel der Untersuchungen von MOLA war eine globale Erfassung der Topographie des Mars mit einer für geophysikalische und geologische Studien ausreichenden Genauigkeit (Zuber et al., 1992). Weitere Ziele, die in dieser Arbeit aber nicht weiter vertieft werden, waren:

- Messungen der Marsatmosphäre, um Rückschlüsse auf atmosphärische Zirkulationen zu ziehen.
- Bestimmung der Oberflächenrauigkeit an möglichen Landestellen künftiger Marsmissionen zur Unterstützung geologischer Untersuchungen.
- Messung des Reflexionsvermögens (Wellenlänge 1064 nm) der Oberfläche, um Erkenntnisse über den mineralogischen Aufbau der Oberfläche und deren jahreszeitlich bedingte Änderungen des Rückstreuvermögens zu erlangen.
- Bestimmung der sich zeitlich ändernden Topographie der Polkappen des Mars, um Rückschlüsse auf die jahreszeitlichen Perioden ziehen zu können.

Diese Höhenmessungen werden benötigt, um die relative Höhe zwischen Oberflächenstrukturen, die Höhe und das Volumen der Polkappen sowie der Vulkane und Krater genauer ableiten zu können als es mit den Daten vorhergehender Missionen möglich ist. Zur Bestimmung der Größe, Geländeneigung und Tiefe von Grabenstrukturen, zur Entdeckung von Kratern und möglichen alten Küstenlinien werden ebenfalls MOLA Messungen verwendet. Die genaue Kenntnis über die auf dem Mars vorhandenen Formen ist besonders wichtig, um damit auf geophysikalische Prozesse schließen zu können, die vor Millionen von Jahren stattgefunden haben.

2.2.3.2 Aufbau von MOLA

MOLA besteht im Wesentlichen aus Sendeeinheit mit dem Laser, Empfängereinheit und Zeit-Intervall-Einheit (TIU) (siehe Abbildung 2.3).

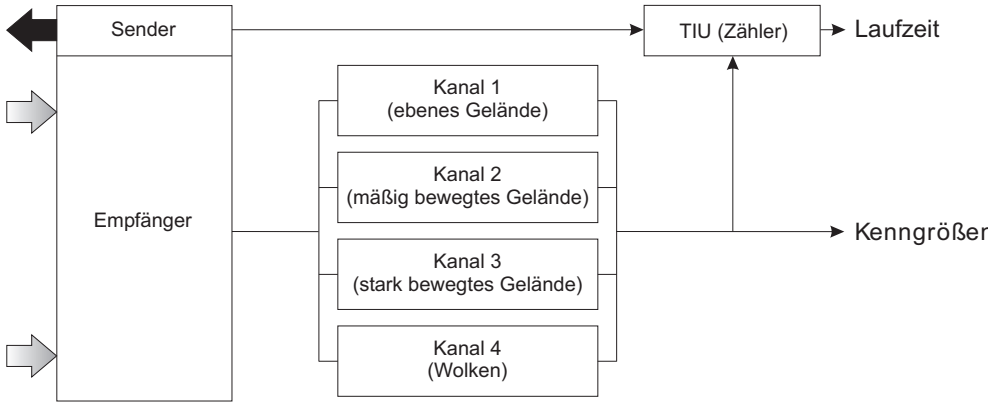


Abbildung 2.3. Sender und Empfänger des Mars Orbiter Laser Altimeter

Der Sender hat einen Chrom-Neodym-Yttrium Aluminium Granat (Cr:Nd:YAG) Oszillator mit 36 Laserdiodenzeilen. Die Pulsrate des Lasers beträgt 10 Hz. Jeder Laserpuls hat eine Pulsdauer von 8 ns. Die Empfängerkomponente besteht aus einem Beryllium Teleskop mit 50 cm Durchmesser mit einer Silikon Avalanche Photodiode (SiAPD), die bereits bei der Detektion von nur wenigen Photonen auslöst und ein elektrisches Signal abgibt. (Abshire et al., 2000).

Bedingt durch die Oberflächenrauigkeit und den Durchmesser des Laserstrahls im Gelände von 168 m sind die rückgestreuten Signale mehr oder weniger verzerrt. Um einerseits alle Signale detektieren zu können und andererseits keine Qualitätsverluste hinnehmen zu müssen, sind mehrere unterschiedlich empfindlich eingestellte Empfangskanäle notwendig.

2.2.3.3 Funktionsweise und Messungen

MOLA misst die Laufzeit jedes einzelnen Laserimpulses zwischen dem Raumschiff und der Mars Oberfläche oder den atmosphärischen Schichten. Beim Abfeuern des Lasers verlässt der größte Teil der Ausgangsenergie den Laser Richtung Marsoberfläche und die TUI wird gestartet. Sind über das Teleskop und die SiAPD genügend vom Gelände zurückgestreute Photonen aufgenommen, wird das Signal, welches eine verzerrte Gaußkurve widerspiegelt, in den vier Empfangskanälen mit einer unverfälschten Gaußkurve korreliert. Bei positiver Korrelation eines Kanals wird die TIU gestoppt. Aufgezeichnet werden, neben der Laufzeit des Lasersignals, der Kanal, bei dem die positive Korrelation zustande kommt. Die Aufzeichnung der Kanalnummer ist wichtig, da sie zur Bestimmung der Geländerauhigkeit beiträgt (Smith et al., 2001).

Der Abstand R_m vom MGS zur Marsoberfläche steht in direktem Zusammenhang zur Laufzeit des Impulses Δt_{opt} und der Lichtgeschwindigkeit c.

$$R_m = \frac{c\Delta t_{opt}}{2} \tag{2.1}$$

Gleichung 2.1 vernachlässigt den Effekt, der durch die atmosphärische Laufzeitverzögerung hervorgerufen wird, da dieser bei der dünnen Marsatmosphäre nur wenige Zentimeter ausmacht. Für die Berechnung der Höhe h_s (siehe Abbildung 2.4) eines Laserspots auf der Marsoberfläche über der MOLA Referenzkugel R_{ref} (Radius = 3396 km) wird zusätzlich zum Abstand R_m die Bahn R_{MGS} und die Lage ϕ des Raumschiffs zur Zeit der Lasermessung benötigt.

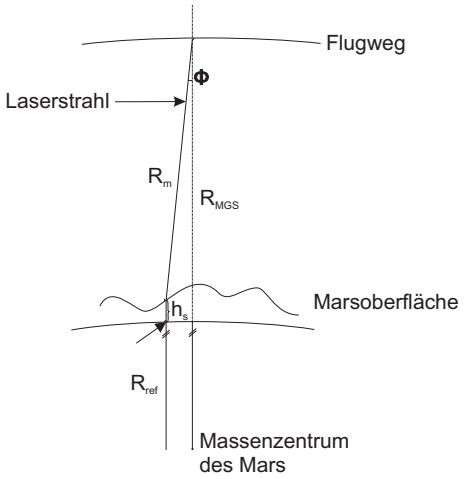


Abbildung 2.4. Geometrie der MOLA Messungen

Der Marsradius an der Stelle eines Laserspots wird durch die Vektordifferenz zwischen dem radialen Abstand vom Raumschiff zum Massenzentrum des Planeten R_{MGS} und dem Abstand zur Oberfläche R_m unter Berücksichtigung der Gravitation und der Lage ϕ berechnet.

2.2.3.4 MOLA Profildaten

Die Rohdaten werden an Stationen des NASA DSN empfangen und an das NASA GSFC weitergeleitet, wo alle Prozessierungen vorgenommen werden. Nach der ersten Prozessierung entstehen die Precision Experiment Data Records (PEDRs), die die Profile von allen MOLA Messungen und abgeleiteten Parametern, sowie die Werte des Areoids an jedem MOLA Spurpunkt enthalten (Smith et al., 2001). Das Areoid ist, wie auf der Erde das Geoid, eine Niveaufläche, d.h. eine Fläche mit konstantem Schwerepotential. Von Zeit zu Zeit werden z.B. wegen verbesserter Orbitparameter die PEDRs neu berechnet. Bei der letzten im Jahr 2003 veröffentlichten Version wurden auch verbesserte Orbits verwendet, die durch Analysen von sich kreuzenden Orbits entstanden (siehe Abschnitt 2.2.1).

Aus der Aufnahmefrequenz des Lasers und der Geschwindigkeit des Raumschiffs ergibt sich ein Abstand der gemessenen Punkte entlang der Flugrichtung von 300 m (von „Schuss-zu-Schuss“). Der Durchmesser des Laserstrahls im Gelände liegt, bedingt durch die Divergenz des Laserstrahls und der Flughöhe von 400 km, bei 168 m. Die Abdeckung quer zur Flugrichtung hängt von der Dichte der Aufnahmeorbits ab und variiert mit dem Breitengrad. Am Äquator betragen die Abstände zwischen den MOLA Spuren in der Regel ca. 500 m. Sie können aber bis zu 15 km große Lücken aufweisen (Kirk et al., 2002).

Die relative Genauigkeit eines Laserpunktes ist durch die Auflösung der Zeitmessung des Laserstrahls begrenzt und beträgt maximal 37,5 cm in ebenem Gelände. In bewegtem Gelände kann sich die Genauigkeit bei 30° Geländeneigung auf über 10 m verschlechtern, da das rückgestreute Signal stärker deformiert ist und nur Kanäle mit geringerer Schwellwerteinstellung dieses Signal detektieren können (Abshire et al., 2000).

Die absolute Genauigkeit hingegen hängt vor allem von den rekonstruierten Orbits und den Lagedaten (siehe Abschnitt 2.2.1) ab, da diese nicht an die relative Genauigkeit der Lasermessungen heranreichen. Während die absolute vertikale Genauigkeit in ebenem Gelände meist unter 10 m liegt und von der Genauigkeit der radialen Komponente des Orbits abhängt, findet sich für die absolute horizontale Genauigkeit der begrenzende Faktor vor allem in der Genauigkeit der Lagedaten. Im Allgemeinen liegt hier die Genauigkeit bei 200 m (Smith et al., 2001).

2.2.3.5 MOLA Geländemodelle

Zusätzlich zu den unregelmäßig verteilten MOLA Profildaten wurden von der NASA während der Mission durch Interpolation regelmäßige DGMs mit einer Auflösung von 32 Gitterpunkten pro Grad (1,85 km am Äquator) generiert. Nach Beendigung der Aufnahmephase entstanden die Mission Experiment Gridded Data Records (MEGDRs) mit Auflösungen von 64 bzw. 128 Gitterpunkten pro Grad (siehe Abbildung 2.5). Dies entspricht einer Bodenauflösung am Äquator von 926 m bzw. 463 m.

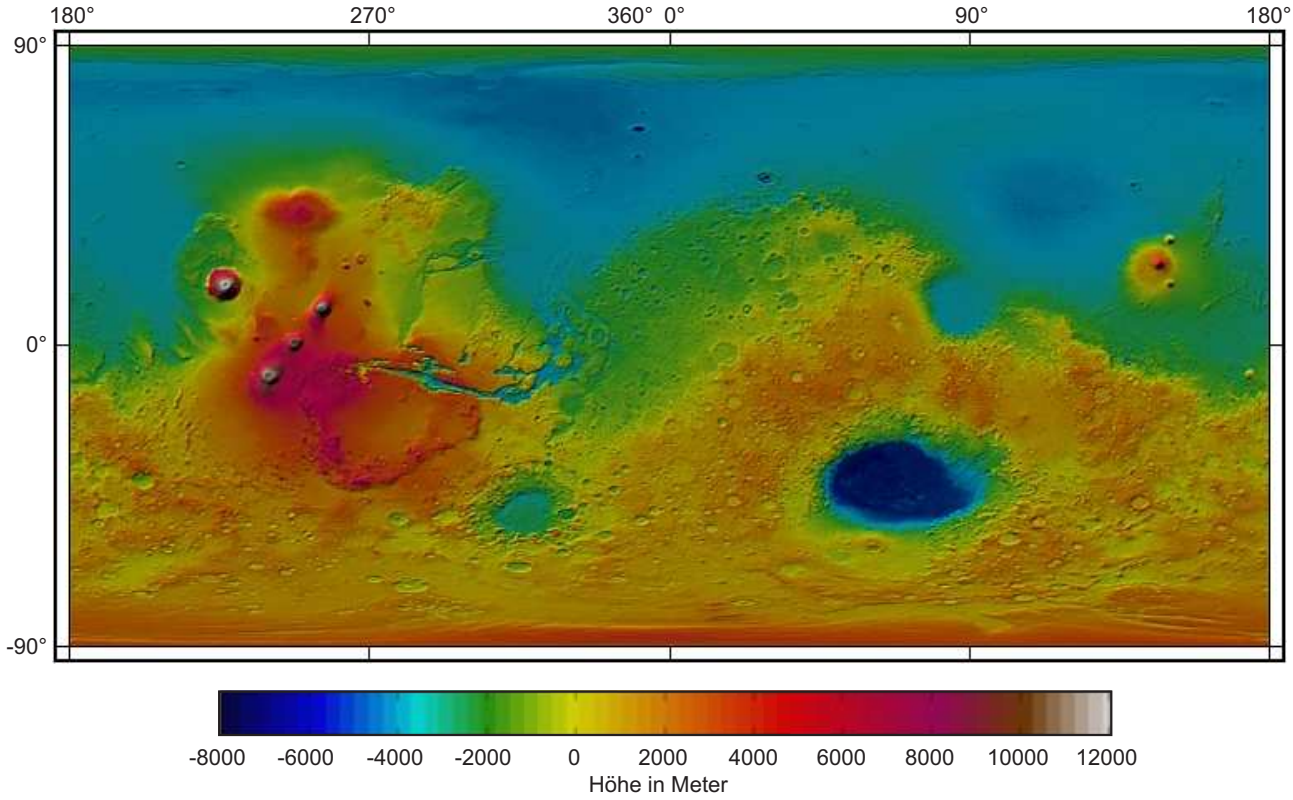


Abbildung 2.5. Digitales Geländemodell aus MOLA Daten über der Referenzkugel

Die MEGDR werden über das NASA Planetary Data System (PDS) veröffentlicht. Sie enthalten für jeden Gitterpunkt die Höhe über der MOLA Referenzkugel und zusätzliche Informationen wie das Areoid, die Differenz zwischen Planetenradius und Areoid und die Anzahl der Messungen, die bei der Berechnung für jeden MOLA Gitterpunkt genutzt wurden. Eine im Jahr 2003 veröffentlichte Version der MEGDR basiert auf den PEDR, bei denen die Orbits verbessert wurden. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu früheren Veröffentlichungen ist die Änderung des Bezugsdatums auf das IAU2000 System (Neumann et al., 2003). Im Gegensatz zu den PEDR, bei denen immer noch systematische Fehler in ganzen Profilen zu finden sind, sind bei den MEGDR eine Vielzahl fehlerbehafteter Punkte eliminiert worden. Über die angewandten Methoden der Fehlerelimination gibt es allerdings nur die Information, dass „bekannt fehlerhafte Spuren manuell entfernt wurden“ (Dorninger et al., 2004).

Die Genauigkeit der MEGDRs liegt im Allgemeinen im Bereich der Profildaten. Schlechter wird diese nur, wenn in den Profildaten über größere Lücken hinweg interpoliert werden musste. Einen Hinweis auf die lokale Genauigkeit kann somit die Anzahl der Messungen, die bei der Berechnung der MOLA Gitterpunkte genutzt wurden, geben.

Eine andere Methode zur Herstellung von MOLA Geländemodellen ohne grobe Fehler wurde an der Technischen Universität Wien entwickelt. Es handelt sich hierbei um einen Ansatz, der ganze Profile verwirft, wenn diese größere Höhendifferenzen zu einem zuvor aus allen Daten berechneten Referenzmodell aufweisen (Briese et al., 2002; Dorninger et al., 2004). Allerdings wurde die Generierung eines DGMs für die ganze Marsoberfläche mit diesem Verfahren nicht vorgenommen, weshalb nicht weiter auf diesen Ansatz eingegangen wird.

2.2.4 Mars Relay Communications Experiment

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle noch auf das Mars Relay Communications Experiment eingegangen, da das Ergebnis dieses Experiments aus geodätischer Sicht als Grundlage für die Mars Express Mission und zukünftige Mars Missionen von Bedeutung ist. Bei diesem Experiment wird die ohnehin schon bestehende Kommunikation zwischen Orbiter und Erde genutzt, um mit Dopplermessungen das Schwerefeld des Mars zu bestimmen. Im Gegensatz zu früheren Missionen sind zwei wesentliche Unterschiede anzuführen. Zum einen wird mit MGS eine weit größere Abdeckung als bei Mariner 9 und Viking 1 & 2 erzielt. Zum anderen wird ein genaueres Modell des Schwerefelds erzeugt, da die Flughöhe im Perizentrum niedriger ist als bei den vorgenannten Missionen und das Tracking anstatt im S-Band im kurzwelligeren X-Band arbeitet (Tyler et al., 2001).

Während der MGS Mission entstanden immer wieder verbesserte Schwerefeldmodelle. Anfangs lag ihre Auflösung in sphärisch-harmonischer Darstellung bei Grad und Ordnung 60, 75 und 80 (Lemoine et al., 2001). Ein weiteres Schwerefeldmodell MGS85F mit Grad und Ordnung 85 folgte 2001. Das im Jahr 2005 erstellte Schwerefeldmodell MGS95J in sphärisch-harmonischer Darstellung bis Grad und Ordnung 95 nutzt zusätzlich zu den bis ins Jahr 2004 aufgezeichneten MGS Daten noch Daten der sich seit dem Jahr 2001 im Marsorbit befindlichen Mars Odyssey Mission (Simpson, 2005).

2.3 Mars Express (MEX)

Mars Express (siehe Abbildung 2.6) ist die erste rein europäische Sonde zum Mars. Sie hat sieben Instrumente an Bord, die alle schon auf der verunglückten Mars 96 Mission (siehe Abschnitt 2.1.3) zum Einsatz kommen sollten. Als einziges neues Experiment ist der Lander Beagle 2 an Bord.

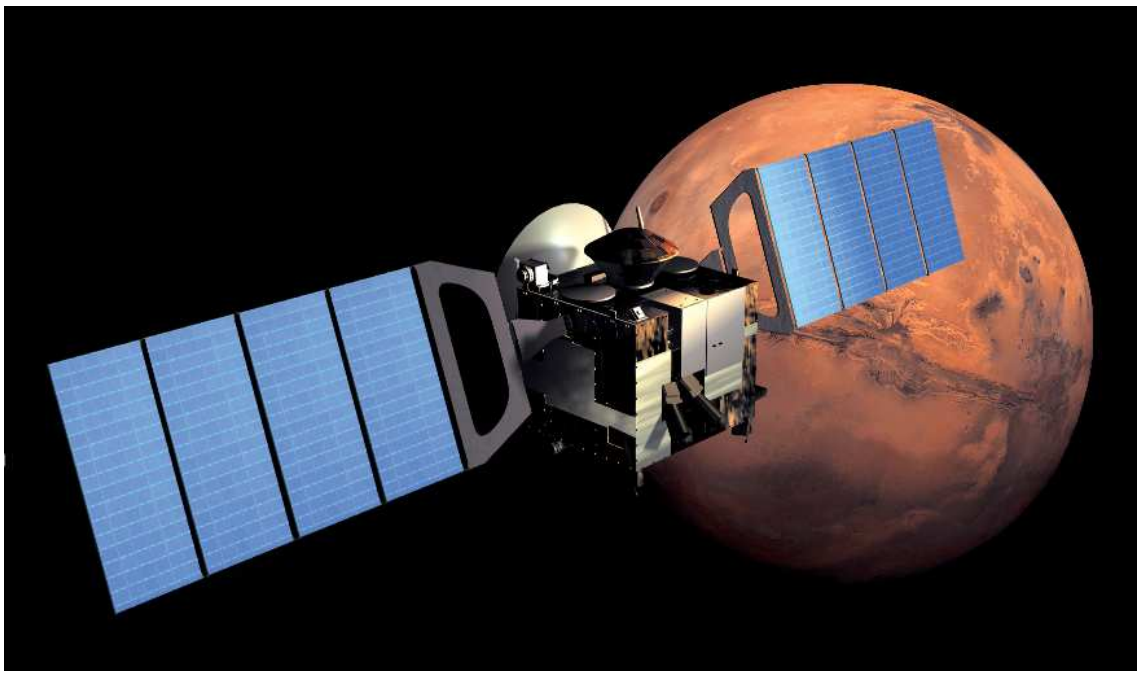


Abbildung 2.6. Mars Express

Am 2. Juni 2003 um 19.45 Uhr startete die Mars Express Sonde mit einer Soyuz-Fregat Trägerrakete vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan. Während des Flugs wurden mit der Kamera kurz nach dem Start am 17. Juli Bilder von der Erde und dem Mond sowie am 3. Dezember aus einer Entfernung von 5,5 Millionen km Bilder des Mars aufgenommen. Eine kritische Phase der Mission erfolgte am 19. Dezember 2003 als der Lander Beagle 2 vom Mutterschiff abgekoppelt wurde. Hierfür musste Mars Express kurze Zeit auf Kollisionskurs mit dem Roten Planeten gebracht werden, da der Lander selbst nicht über ein eigenes Antriebssystem verfügte. Nach dem erfolgreichen Abkoppeln von

Beagle 2 flog dieser direkt auf den Planeten zu, während das Mutterschiff durch erneute Kurskorrektur wieder auf die ursprüngliche Flugbahn gebracht wurde (Morley et al., 2004).
Der Einschuss des Orbiters in die Umlaufbahn erfolgte am Morgen des 25. Dezember 2003 nach einer Flugdauer von 205 Tagen. Für dieses Manöver musste das Haupttriebwerk für ca. 34 Minuten eingeschaltet werden, um die Geschwindigkeit des Orbiters an den Mars anzupassen. Nach mehreren Manövern erreichte Mars Express am 28. Januar 2004 seinen vorläufig endgültigen Aufnahmeorbit.
Etwa zeitgleich mit dem Einschuss des Orbiters in die Umlaufbahn am 25. Dezember 2003 sollte der Lander Beagle 2 auf der Oberfläche des Mars aufsetzen. Alle Versuche, den Lander zu kontaktieren, schlugen allerdings fehl. Am 6. Februar 2004 wurde Beagle 2 endgültig für verloren erklärt.

2.3.1 Ziele, Methoden und Experimente

Wie bei vielen früheren Missionen ist auch bei Mars Express wieder ein Ziel, nach Spuren von Wasser auf der Oberfläche und im Marsinneren zu suchen. Weitere Ziele bestehen darin, die Oberfläche genauer als bisher zu kartieren und die Atmosphäre zu untersuchen. Hierfür befinden sich sieben Instrumente an Bord, die durch Beagle 2, ein lokal auf der Oberfläche arbeitendes Experiment, unterstützt werden sollten. Im einzelnen sind dies aus verschiedenen europäischen Ländern stammende Experimente (Wilson und Chicarro, 2004):

- HRSC (Deutschland): Die hochauflösende Stereokamera nimmt den Planeten mit einer Bodenauflösung von bis zu 12 m in Farbe und Stereo auf. Ausgewählte Gebiete werden mit dem Super Resolution Channel (SRC) mit einer höheren Bodenauflösung von 2,3 m aufgenommen, um bestimmte Details noch genauer untersuchen zu können (siehe Abschnitt 2.3.2).

- OMEGA (Frankreich): Das Instrument ist ein im sichtbaren und infraroten Bereich arbeitendes abbildendes Spektrometer. Es untersucht die Zusammensetzung der Oberfläche mit Hilfe des auf der Oberfläche reflektierten Lichts in einem Wellenlängenbereich von 0,5 – 5,2 μm.

- SPICAM (Frankreich): Dieses Spektrometer arbeitet mit zwei Spektralkanälen (IR- und UV-Bereich) und untersucht die Zusammensetzung der Atmosphäre. Licht mit einer Wellenlänge von 250 nm (UV-Bereich) wird von Ozon, die Strahlung mit einer Wellenlänge von 1,38 μm von Wasserdampf absorbiert. Über die gesamte Laufzeit der Mission wird der Ozon- und der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre zu unterschiedlichen Jahreszeiten bestimmt.

- PFS (Italien): Das Planetary Fourier Spectrometer erforscht die Marsatmosphäre, indem es die Absorptionsspektren von Molekülen in einem breiten Spektralbereich (1,2 bis 45 μm) misst. Da die Atmosphäre des Mars zu 95% aus Kohlendioxid besteht, kann mit der Messung der Absorption des Kohlendioxids der Bodendruck und über die Verschiebung des Absorptionsmaximums die Temperatur bestimmt werden. Des Weiteren wird mit dem Instrument nach Spurengasen wie Kohlenmonoxid, Methan und Formaldehyd gesucht.

- ASPERA (Schweden): Der Energetic Neutral Atoms Analyser detektiert Partikel in der oberen Atmosphäre, die durch den kontinuierlichen Beschuss durch Sonnenwinde in dieser entstehen.

- Mars Radio Science Experiment (Deutschland): Dies ist kein eigenes Instrument, sondern es nutzt die Funksignale, die Informationen wie Daten oder Kommandos zwischen Erde und Mars übertragen. Diese Funksignale werden von der Atmosphäre abgeschwächt, die Frequenz wird verändert oder phasenverschoben und von der Oberfläche reflektiert. Die Signaländerungen werden genutzt, um Dichte, Temperatur und Druck der Atmosphäre zu bestimmen. Außerdem kann das Gravitationsfeld durch relative Änderungen der Geschwindigkeit des Orbiters bestimmt werden.

- MARSIS (Italien): Das Sub-Surface Sounding Radar Altimeter sendet mit seinen zwei 25 m langen Antennen niedrig frequente Radarwellen (1,3 – 5,5 MHz) zur Oberfläche, von denen die meisten dort reflektiert werden. Ein kleiner Teil allerdings dringt bis zu wenigen Kilometern in die Oberfläche ein und reflektiert erst an anderen Materialschichten, die auch aus Wasser oder Eis bestehen können.

- BEAGLE 2 (Großbritannien): Dies ist ein Lander, der mit verschiedenen Instrumenten die Oberfläche und das Marsinnere untersuchen sollte. Die auf einem Greifarm angebrachten Instrumente waren eine Stereokamera, ein Mikroskop, das Mössbauer Spektrometer, der Bohrer PLUTO, ein Röntgenstrahlenspektrometer und eine paar kleinere Sensoren zur Bestimmung einiger Umgebungsparameter wie Temperatur und Druck.

In den folgenden Kapiteln soll nur noch auf die HRSC näher eingegangen werden, da die anderen Experimente nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

2.3.2 High Resolution Stereo Camera (HRSC)

Die HRSC wurde Anfang der 1990er Jahre beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen entwickelt und von Dornier in Friedrichshafen im Auftrag des DLR gebaut (siehe Abbildung 2.7/1). Für die Mars 96 Mission (siehe Kapitel 2.1.3) entstanden zwei Flugmodelle (FM1 und FM2), von denen FM1 bei Mars 96 zum Einsatz kam. Nach dem Scheitern der Mars 96 Mission, bei der FM1 verloren ging, wurde FM2 beim DLR in Berlin-Adlershof aufbewahrt und im Jahr 2002 mit einer neuen Elektronik in den Mars Express Orbiter eingebaut. Ebenfalls wurde die Kamera für diese Mission um einen zusätzlichen Sensor, den SRC, erweitert (siehe Abbildung 2.7/2), (Neukum et al., 2004).

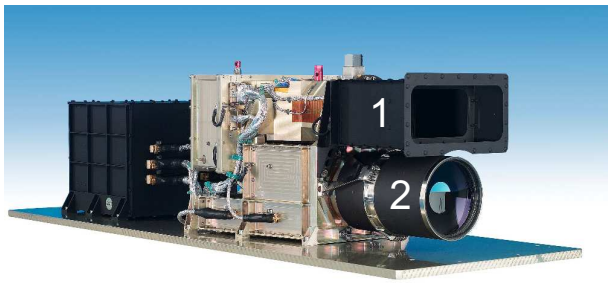


Abbildung 2.7. HRSC(1) und SRC(2) (Quelle: DLR)

2.3.2.1 Aufbau der Kamera

Die für die Mars 96 Mission entwickelte HRSC besteht in ihrer ursprünglichen Version aus 9 CCD Sensoren (siehe Abbildung 2.8), die hinter einem Linsenobjektiv parallel auf drei Fokalplatten angeordnet sind und nach dem Push-Broom Prinzip arbeiten. Jeder Sensor besteht aus einer Zeile mit je 5272 Sensorelementen, von denen 5184 aktiv sind. Die Größe eines Sensorelements beträgt 7 μm x 7 μm.

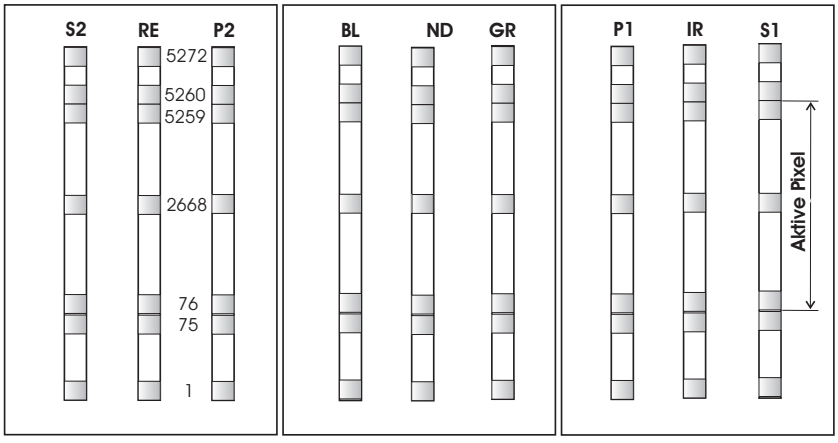


Abbildung 2.8. Fokalplatten der HRSC

Von den 9 CCD Sensoren sind 3 panchromatische Sensoren für die Stereoauswertung mit Nadir (ND)-, Vorwärts (S1)- und Rückwärtsblick (S2) vorhanden. Von den restlichen Sensoren sind zwei weitere Sensoren (P1, P2) für photometrische Zwecke und 4 Sensoren (RE = rot, BL = blau, GR = grün, IR = Infrarot) für Multispektralanwendungen vorgesehen. Die photometrischen Sensoren können aber ebenfalls für die Stereoauswertung verwendet werden, da sie auch im panchromatischen Wellenlängenbereich arbeiten. Die Konvergenzwinkel zwischen dem Nadir- und den Stereosensoren betragen 21 gon und zwischen dem Nadir- und den Photometriesensoren 14 gon.
Der SRC besteht aus einem panchromatischen CCD Flächensensor mit 1024 x 1024 Pixelelementen und einem Spiegelteleobjektiv mit einer Brennweite von 975 mm. Die Größe eines Pixelelements beträgt 9 μm x 9 μm. Bei einer einzigen Aufnahme aus einer Flughöhe von 270 km überdeckt der SRC einen Bereich von etwa 2,5 x 2,5 km^2 mit einer Bodenauflösung von 2,5 Metern. Die Überdeckung der nacheinander aufgenommenen Flächenbilder reicht aus, um die Bilder zu mosaikieren, aber nicht um Stereophotogrammetrie zu betreiben. Somit ist es mit dem SRC nicht möglich, die Bahn des Orbiters zu verbessern.

2.3.2.2 Aufnahme der Bilddaten

Um den Aufnahmeprozess der Bilddaten besser darstellen zu können, müssen zunächst einige Begriffe erklärt werden:

- ein **Sensor** besteht aus 5184 aktiven Sensorelementen/Pixeln (siehe Abbildung 2.8).
- eine **Zeilenbild** ist ein Bild eines Sensors, aufgenommen zu einem bestimmten Zeitpunkt.
- ein **Bild** wird aus mehreren Zeilenbildern während eines Überflugs zusammengesetzt.
- ein **Streifen** bzw. **Bildstreifen** besteht aus bis zu neun Bildern.
- ein **Block** setzt sich aus mehreren Streifen zusammen.

Ein Bild eines Sensors wird aus mehreren, zeitlich nacheinander aufgenommenen Zeilenbildern zusammengesetzt. Durch das gleichzeitige Betreiben mehrerer Sensoren entsteht ein Streifen aus Stereobildern. Ein Block ergibt sich durch Zusammensetzen mehrerer Streifen. Gewöhnlich haben zwei nebeneinander liegende Streifen etwa 10% Überdeckung.
Die Auflösung eines 7 μm großen Pixels beträgt am Boden bei der niedrigsten Flughöhe über der Marsoberfläche 11 m. Dies ergibt bei einem Sensor mit 5184 aktiven Pixeln eine Streifenbreite von etwa 60 Kilometern. Wegen des stark elliptischen Orbits können die Bodenauflösung und die Streifenbreite innerhalb eines aufgenommenen Streifens variieren. Die Streifenlänge hängt davon ab, wie lange die Sensoren eingeschaltet bleiben und beträgt in der Regel zwischen 400 km bis 4000 km (siehe Abbildung 2.9). Um quadratische Bodenpixel aufzunehmen, kann die Integrationszeit der Sensorelemente von 2,24 ms bis 54,5 ms variiert werden.

Abbildung 2.9. Teil eines Bildstreifens der HRSC (Quelle: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

Wegen fehlender Bandbreite können die Daten der Sensoren in verschiedenen Auflösungsstufen zur Erde übertragen werden. Aus diesem Grund wurde das sogenannten Makropixelformat (MPF) eingeführt. Die Daten können entweder in höchster Auflösung (MPF 1) zur Erde gesandt werden oder es werden 4 Pixel (MPF 2), 16 Pixel (MPF 4) oder 64 Pixel (MPF 8) zu einem Pixel zusammengefasst. Nach der Makropixelkomprimierung werden die Daten zusätzlich mit der bekannten JPEG-Komprimierung gepackt. Beide Komprimierungen erfolgen in der HRSC Digital Unit, d.h. noch bevor die Daten im Raumschiff zwischengespeichert werden. Notwendig ist die Zwischenspeicherung wegen des fehlenden Funkkontakts zur Erde während der Aufnahmen. Erst nach Abschluss der gesamten Aufnahme werden die Daten zur Erde übertragen.

2.3.2.3 Laborkalibrierung

Die Laborkalibrierung setzt sich aus einer radiometrischen und einer geometrischen Kalibrierung zusammen. Erstere wurde für die HRSC FM2 Ende 1995 beim DLR in Oberpfaffenhofen durchgeführt. Die geometrische Laborkalibrierung hingegen fand Anfang 1996 bei Dornier in Friedrichshafen statt. Im Folgenden soll nur auf die für die Bündelausgleichung wichtige geometrische Kalibrierung der Kamera eingegangen werden (Carsenty et al., 1997), die die Bestimmung der inneren Orientierung mit höchst möglicher Genauigkeit zum Ziel hat. Auf die Umrechnung der Ergebnisse der geometrischen Laborkalibrierung in Parameter der inneren Orientierung, die in dem verwendeten mathematischen Modell Eingang finden, wird in Abschnitt 4.1 eingegangen.

Als Verfahren für die geometrische Kalibrierung einer Kamera sind Laborkalibrierung, Testfeldkalibrierung, simultane Selbstkalibrierung und Sternenkalibrierung denkbar. Im Fall der HRSC wurde vor dem Einbau der Kamera in den Orbiter eine Laborkalibrierung vorgenommen, die aber nicht unproblematisch ist, da während des Starts große Vibrationen auf das gesamte Raumschiff und somit auch auf den Orbiter mit der Kamera einwirken. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich beim Start aufgrund des physikalischen Aufbaus der Kamera die einzelnen Sensoren auf der Klebefläche nur um maximal 1 μm orthogonal zur optischen Achse verschieben sollten. Eine Verbiegung einzelner Sensoren wird nicht erwartet. Zur Überprüfung dieser Theorie wurde die Kamera einigen Schütteltests unterzogen, um die Einwirkung der beim Start erwarteten Vibrationen zu simulieren. Die Ergebnisse einer anschließenden Überprüfung der Kalibrierung zeigten, dass sich gegenüber der Laborkalibrierung keine messbaren Veränderungen in der Kamerageometrie ergaben (Hirsch, 2002). Bei Sternenbeobachtungen während des Flugs zum Mars konnten nur wenige Sterne mit der HRSC aufgenommen werden. Für eine Überprüfung der geometrischen Laborkalibrierung reichen diese Beobachtungen nicht aus. Allerdings konnte mit den Beobachtungen eine Bestimmung der Offsetwinkel (Alignments) zwischen HRSC und Raumschiff vorgenommen werden (Roatsch, 2005).

Die geometrische Laborkalibrierung erfolgte mit der vollständig montierten Kamera. Daher sind in den Messungen alle Einflüsse, die durch das Objektiv, die Filterplatten oder die CCD Sensoren verursacht werden, enthalten. Es handelt sich daher um eine Systemkalibrierung. Abbildung 2.10 zeigt den Aufbau der geometrischen Laborkalibrierung. Das Licht verlässt die Lichtquelle, tritt durch ein mit Spalten und Löchern strukturiertes Kalibrationstarget hindurch und trifft auf den Kollimator. Der im Kollimator entstehende Kollimatorstrahl enthält somit die Strukturen des Kalibrationstargets, die mit einem Abbildungsmaßstab auf die CCD Sensoren auftreffen.

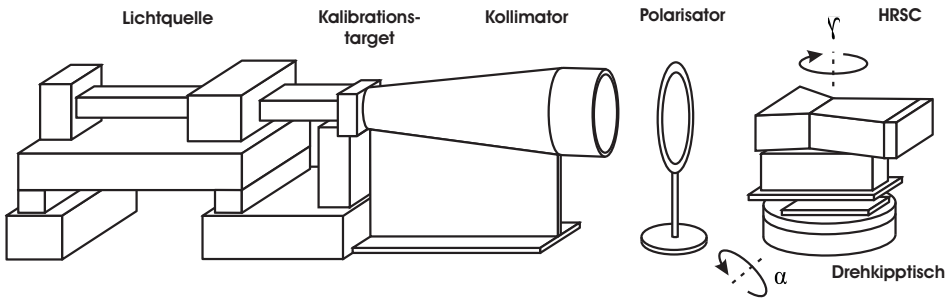


Abbildung 2.10. Messaufbau für die geometrische Kalibrierung der HRSC

Die Kamera selbst befindet sich auf einem Drehkipptisch, mit welchem ausgewählte Pixel eines CCD Sensors der Kamera durch Drehung und Kippung in die optische Achse des Kollimatorstrahls gebracht werden können. Die eingestellten Winkel α (Kippwinkel) und γ (Drehwinkel) können gemessen werden und beschreiben die Winkel zum eingestellten CCD Pixel. Die Messungen der Winkel α und γ erfolgen im messplatzfesten Koordinatensystem, welches durch das Lot und die optische Achse des Kollimatorstrahls definiert ist.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Messung besteht in der Kombination der gezielten Drehung und Kippung des Messtisches und der Nachführung des Kalibrationstargets. Da der Kollimator nur ein

Gesichtsfeld für Abbildungen von 400 Pixeln besitzt, wird der CCD Sensor mittels Kameradrehung um γ und das Pixel mittels Kamerakippung um α gewählt.

Die Winkelmessung des ausgewählten CCD Sensors erfolgt durch Anmessung jedes 400. Pixels durch das Mittenloch des Kalibrationstargets. Für die gesamte Länge des CCD Sensors sind somit 13 Verkippungen der Kamera notwendig. Um den genauen γ Winkel zu messen wird für jede dieser 13 Positionen die Kamera in kleinen Schritten über den Sensor hinweg gedreht und die Lichtsignale gemessen. Aus dem Maximum der Lichtkurve ergibt sich der exakte γ Winkelwert. Ebenfalls werden bei jeder Messung die Strukturen des Kalibrationstargets auf ca. 21 Pixel des CCD Sensors abgebildet und der α Winkelwert aus diesen Strukturen mittels Interpolation ermittelt. Die Winkelpaare für alle anderen aktiven Pixel eines CCD Sensors werden durch Interpolation erzeugt. Die Ergebnisse werden schließlich vom messplatzfesten Kamerakoordinatensystem in kartesische Pixelkoordinaten in einer fiktiven Fokalebene mit einer Brennweite von 175 mm umgerechnet.

Fehler, die durch den Brechungsindex der Luft entstehen und als Fokusdifferenz zwischen Vakuum (Weltraum) und Luft (Labor) sichtbar sind, werden durch ein gezieltes Defokussieren des Kollimators korrigiert. Korrekturen müssen außerdem an den Messergebnissen außeraxialer Pixel angebracht werden, d.h. für beleuchtete Pixel, die neben dem durch das Mittenloch des Kalibrationstargets beleuchteten Pixel liegen. Die absolute Einstellgenauigkeit der Winkel γ und α beträgt ± 2 Bogensekunden (= 0,6 mgon). Um die durch die Einstellgenauigkeit hervorgerufenen und weitere zufällige Fehler zu reduzieren, werden mehrere Messungen in jedem CCD Sensor durchgeführt, so dass signifikante Ergebnisse erhalten werden.

2.3.3 Bahn- und Lagedaten

Die in der Photogrammetrie verwendete äußere Orientierung setzt sich aus den Bahn- und Lagedaten zusammen. Da diese hinsichtlich Messung und Genauigkeit voneinander unabhängig sind, werden sie zunächst getrennt behandelt.

2.3.3.1 Bahndaten und deren Genauigkeiten

Mars Express fliegt auf einer stark exzentrischen Bahn. Dies ist notwendig, da eine minimale Flughöhe über der Marsoberfläche von 270 km erreicht werden soll und außerdem Bahnmanöver nur sehr wenig Treibstoff kosten dürfen. Eine polnahe Bahn ist außerdem wichtig, da die gesamte Oberfläche des Mars überflogen und aufgenommen werden soll (siehe Tabelle 2.2).

Große Halbachse	ca. 8600 km
Numerische Exzentrizität	0,61
Bahnneigung (Inklination)	86,6°

Tabelle 2.2. Mars Express Orbitdaten

Bestimmt wird die dreidimensionale Bahn des Raumschiffes vom European Space Operation Centre (ESOC) anhand von Dopplerverschiebungen zu ein oder zwei Bodenstationen (Perth, Kourou) und durch Orbitanalysen. Pro Umlauf werden etwa 15 Messungen zum Orbiter durchgeführt, allerdings nicht während die Instrumente arbeiten und der Orbiter auf die Marsoberfläche ausgerichtet ist. In diesen Fällen besteht keine Funkverbindung zu einer Bodenstation. Für die Rekonstruktion des Orbits wird ein in der Mariner 9 Mission (siehe Abschnitt 2.1.1), den Viking Missionen (Kapitel 2.1.2) und der MGS Mission (Kapitel 2.2) mit Dopplermessungen bestimmtes Schwerefeld genutzt.

Für die Genauigkeit des Orbits im Perizentrum gibt das ESOC einen Bereich durch einen minimalen und einen maximalen Wert an, welcher für die Dauer der ganzen Mission gilt. Tabelle 2.3 zeigt diesen Genauigkeitsbereich für X (entlang der Flugrichtung), Y (quer zur Flugrichtug) und Z (radialer Abstand zum Marszentrum).

Die absolute Genauigkeit hängt im Wesentlichen von der Anzahl der Dopplermessungen während eines Umlaufs, der Anzahl der messenden Bodenstationen, der Aufnahmekonstellation und der Genauigkeit

X	Y	Z
10 - 2120 m	2.5 - 795 m	1 - 80 m

Tabelle 2.3. Genauigkeit des Orbits im Perizentrum

der Messungen selbst ab. In der Regel werden die Messungen nur von Perth aus durchgeführt und können durch Messungen aus Kourou ergänzt werden. Die relative Genauigkeit des rekonstruierten Orbits hingegen hängt in erster Linie von der Genauigkeit des Schwerefelds ab (Hechler und Yáñez, 2000; Pulido-Cobo und Schoenmaekers, 2004).

2.3.3.2 Lagedaten und deren Genauigkeiten

Die Lagewinkel werden vom ESOC kommandiert und an Bord des Orbiters mittels Schwungrädern eingestellt. Mit eingeschalteten Experimenten und Blick auf die Marsoberfläche werden die eingestellten Lagewinkel (predicted attitude) alle 125 ms (8 Hz) mit Kreiseldaten überprüft, die wiederum alle 500 ms (2 Hz) durch Absolutmessungen der Sternenkamera aktualisiert werden. Intern arbeiten die drei Kreisel mit 200 Hz. Die Sternenkamera kann in ihrem Gesichtsfeld die Richtungen zu maximal neun Sternen bestimmen. Werden Differenzen zwischen kommandierten Lagewinkeln und eingestellten Lagewinkeln (reconstructed attitude) festgestellt, werden die Lagewinkel des Orbiters wiederum durch die Schwungräder korrigiert.

Als Ergebnis werden vom ESOC die sogenannten kommandierten Lagewinkel geliefert. Die eingestellten Lagewinkel können wegen fehlender Bandbreite nicht vom Orbiter zur Erde übertragen werden. Die absolute Genauigkeit der eingestellten Lagewinkel werden vom ESOC für die Dauer der ganzen Mission mit 28 mgon für alle drei Lagewinkel angegeben (Astrium, 2001; Lauer, 2001; Lauer et al., 2004).

2.3.3.3 Äußere Orientierung

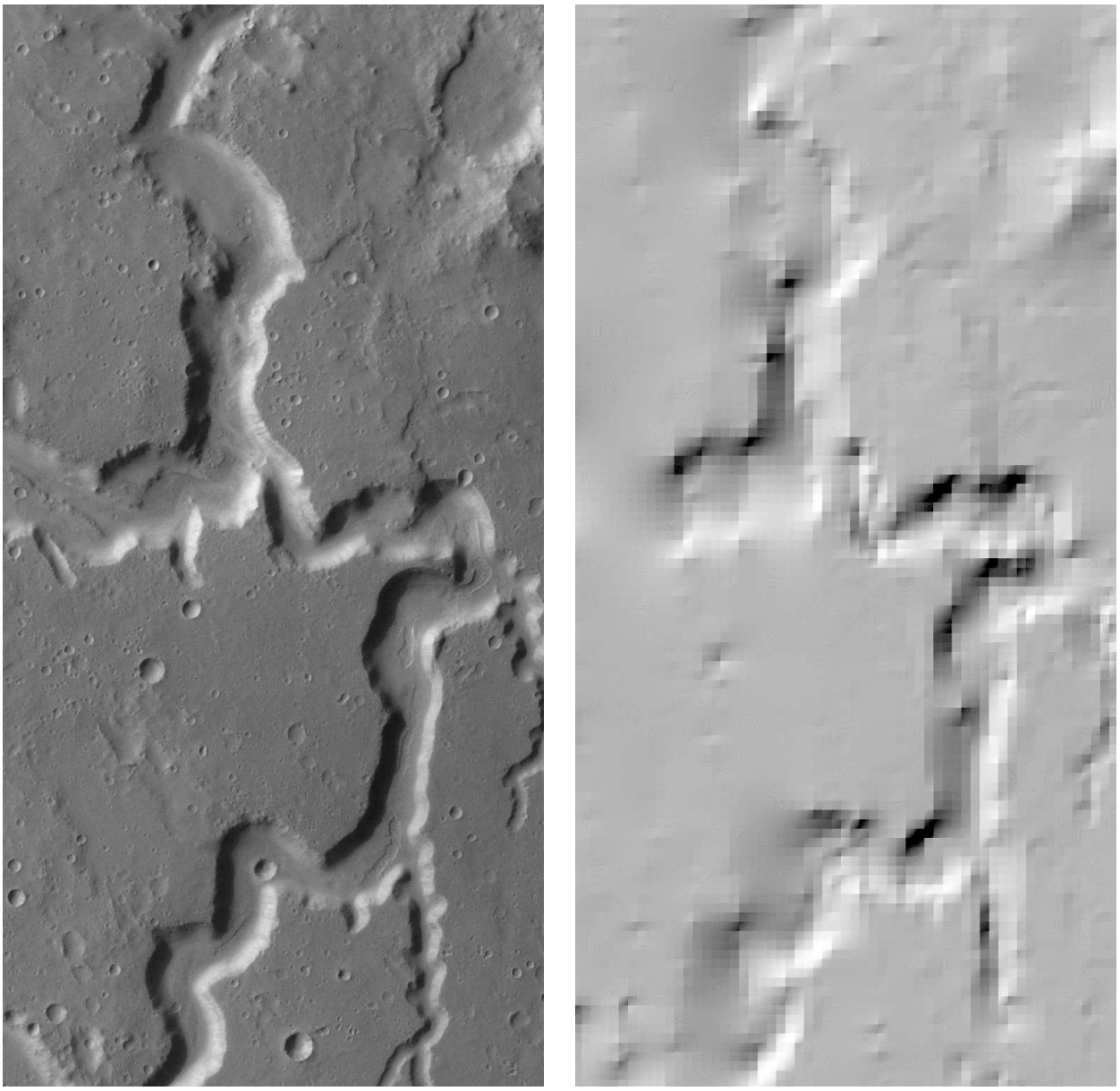
Diese Messergebnisse werden vom ESOC und dem DLR in die für die photogrammetrische Punktbestimmung direkt nutzbare äußere Orientierung transformiert. Liegen für Aufnahmepositionen einzelner Zeilenbilder keine Messergebnisse vor, werden diese durch Interpolation aus den Messergebnissen gewonnen. Zusätzlich wird an den Bahndaten die sogenannte light time correction angebracht, die berücksichtigt, wieweit der Mars während der Laufzeit des Lichts von der Oberfläche zur Kamera weiter rotiert (Roatsch, 2005). Die Bahn liegt danach in globalen, marsfesten Koordinaten im System IAU2000 vor, während die Drehungen in Winkeln um die jeweiligen Achsen mit der Drehreihenfolge φ, ω und κ angegeben werden. Die Genauigkeiten entsprechen in der Größenordnung den oben angegebenen Genauigkeitswerten.

2.4 Gegenüberstellung von HRSC und MOLA Daten

Bei den Datensätzen der beiden Sensoren HRSC und MOLA handelt es sich um zwei Datensätze, die mit verschiedenen Aufnahmeverfahren aufgenommen werden. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Bodenauflösungen und Genauigkeiten. Das in Abbildung 2.11 dargestellte Gebiet hat eine Ausdehnung von etwa 35 x 70 km^2 und befindet sich in der Nähe des Äquators. Im Folgenden werden wesentliche Eigenschaften sowie die sich daraus ergebenden Vor- und Nachteile der beiden Datensätze (siehe Abbildung 2.11) dargestellt.

2.4.1 Vor- und Nachteile der HRSC Daten

Aufgenommen wurde das Gebiet von der HRSC in Orbit 905 am 3. Oktober 2004 mit einer nominalen Bodenauflösung von 22 m. Abbildung 2.11(a) zeigt ein vorläufiges, mit Hilfe des MOLA DGM erzeugtes, HRSC Orthophoto des ND Sensors. Es weist für alle Objekte wenig Glättung auf. Dies ist an steilen Abhängen und in stark bewegtem Gelände am deutlichsten sichtbar. Ebenfalls sind in dem HRSC Bild



(a) HRSC Orthophoto (vorläufig) (b) MOLA DGM (Schummerung)

Abbildung 2.11. Vergleich HRSC und MOLA Daten

einige kleine Objekte zu erkennen, die im MOLA DGM (siehe Abbildung 2.11(b)) überhaupt nicht vorhanden sind. Die Vorteile der HRSC Daten liegen zweifellos in der Sichtbarkeit auch von kleinen Objekten und einer hohen relativen Genauigkeit innerhalb eines Streifens.

Ein großer Nachteil im Vergleich zum MOLA DGM zeigt sich bei der schlechteren globalen Genauigkeit einzelner HRSC Streifen, die auf die Messmethode der Parameter der beobachteten äußeren Orientierung (siehe Abschnitt 2.3.3) zurückzuführen ist. Werden Gebiete betrachtet, die aus mehreren nebeneinander liegenden HRSC Einzelstreifen bestehen, verbessert sich nach einer Bündelausgleichung die relative Genauigkeit dieser nebeneinander liegenden Streifen.

2.4.2 Vor- und Nachteile der MOLA Daten

Die bei der MGS Mission aufgenommenen MOLA Spurpunkte sind durch die NASA zu einem MOLA DGM prozessiert worden (siehe Abschnitt 2.2.3.4). In Abbildung 2.11(b) ist das geschummerte MOLA DGM für den gleichen Ausschnitt dargestellt, in dem sich, im Vergleich zum vorläufigen HRSC Orthophoto (siehe Abbildung 2.11(a)), größere geglättete Bereiche deutlich erkennen lassen. Diese geglätteten

Bereiche entstehen beim Erstellen des DGM aus MOLA Spurpunkten, wenn das Gelände zwischen den bis zu 15 km großen Lücken interpoliert werden musste. Im Regelfall zeichnen sich die MOLA Spurpunkte durch ihre hohe Punktdichte entlang eines Orbits und durch einen mittleren Punktabstand über den gesamten Mars von 500 m zwischen den MOLA Profilen aus. Dies führt bei allen Objekten zu mehr oder weniger starker Glättung. Einige Objekte, wie kleine Krater, sind im MOLA DGM nicht vorhanden, wenn sie sich in einer Lücke der MOLA Spurpunkte befinden.

Als Vorteil im Gegensatz zu HRSC Daten erweist sich die globale Genauigkeit. Diese ist zum einen auf die Messmethode der beobachteten Bahn und Lagewinkel des MGS Raumschiffs (siehe Abbildung 2.2.1) zurückzuführen. Zum anderen ergibt sich die hohe globale Genauigkeit durch die gute globale Abdeckung der MOLA-Daten und die nach Beendigung des MOLA Experiments durchgeführten globalen Analysen. Die globale Höhengenauigkeit einzelner Spurpunkte liegt meist unter 10 m. Als Nachteil können die interpolierten Bereiche und fehlende Objekte angesehen werden.

3. Bisherige Arbeiten

3.1 Photogrammetrische Punktbestimmung mit Zeilenbilddaten

Das Grundprinzip der photogrammetrischen Punktbestimmung mit einer Dreizeilenkamera besteht im Wesentlichen aus drei Schritten. Zunächst erfolgt die Bildaufnahme mit der Dreizeilenkamera, wodurch drei Bildstreifen entstehen, die dasselbe Gelände aus unterschiedlichen Blickwinkeln zeigen. Im zweiten Schritt werden in den Bildstreifen homologe Bildpunkte bestimmt, bevor im dritten Schritt in einem geschlossenen Ausgleichungsverfahren die Parameter der äußeren Orientierung und die zu den homologen Bildpunkten gehörenden Objektpunkte bestimmt werden.

3.1.1 Aufnahmeprinzip

Die Bildaufnahme erfolgt mit einer Dreizeilenkamera nach dem sogenannten „Push-Broom-Prinzip“ (Hofmann, 1982). Eine Dreizeilenkamera weist drei CCD Sensoren auf. Diese Sensoren sind entweder alle hinter einem gemeinsamen Objektiv auf einer Fokalebene nebeneinander angeordnet oder es wird jedem Sensor ein eigenes Objektiv zugeordnet (siehe Abbildung 3.1). Im ersten Fall ergibt sich der Konvergenzwinkel zwischen Nadir (N)- und Vorwärts (V)- bzw. Rückwärtsblick (R) durch die Lage der Sensoren außerhalb des Bildhauptpunkts. Im anderen Fall ergibt sich der Konvergenzwinkel durch eine Verkippung der Stereokanäle gegenüber dem Nadirkanal.

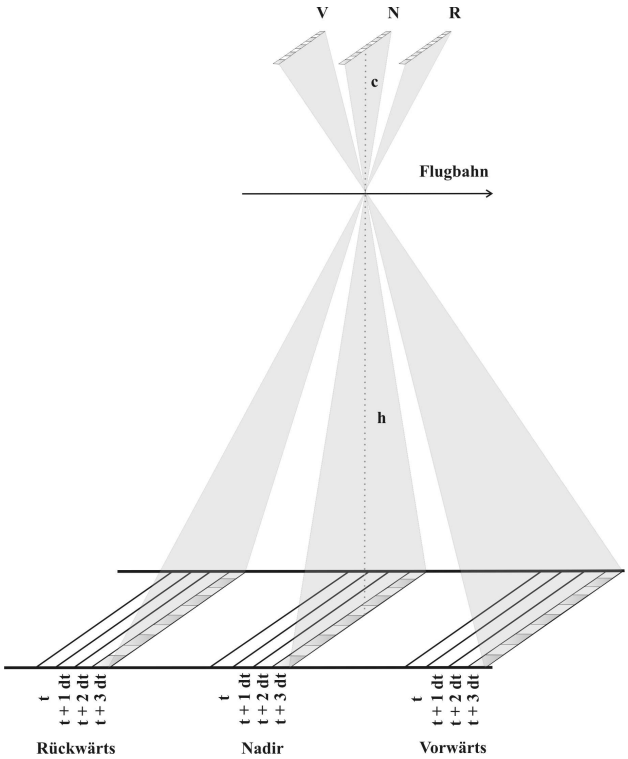


Abbildung 3.1. Aufnahmeprinzip einer Dreizeilenkamera

Während des Flugs tasten die Sensoren das Gelände fortlaufend zeilenweise zeitlich nacheinander ab. So wird z.B. zum Zeitpunkt t das erste Zeilenbild und zum Zeitpunkt $t+1$ das zweite Zeilenbild aufgenommen. Das gesamte Bild eines Sensors wird durch Zusammensetzen der einzelnen Zeilenbilder gewonnen. Bedingt durch die Konvergenzwinkel sind die erzeugten drei Bilder stereoskopisch auswertbar. Während die Bilder in Zeilenrichtung eine Zentralperspektive aufweisen, liegt in Flugrichtung keine Zentralperspektive vor, da die einzelnen Zeilenbilder unterschiedliche Projektionszentren aufweisen. Die Länge eines Streifens kann beliebig sein und ist nur durch äußere Umstände wie z.B. die Speicherkapazität der Kamera begrenzt, während für die Streifenbreite die Länge des Sensors, die Flughöhe h und die Kammerkonstante c ausschlaggebend sind (siehe Abschnitt 2.3.2.2).

3.1.2 Bestimmung homologer Bildpunkte

Die Bestimmung homologer Bildpunkte (Verknüpfungspunkte) erfolgt mittels manueller Messungen oder automatischer Bildzuordnungsverfahren (Matching). Aus der Literatur sind zahlreiche automatische Bildzuordnungsverfahren bekannt, die zwar zum Teil verschiedene Algorithmen verwenden, aber alle zum Ziel haben, die Bilddaten der verschiedenen Sensoren über homologe Punkte zu verknüpfen. Aus diesen zahlreichen Bildzuordnungsverfahren wird im Folgenden eines der beiden bei der Mars Express Mission verwendeten Verfahren beschrieben.

Dieses Bildzuordnungsverfahren folgt einer „vom Groben ins Feine"-Strategie, d.h. es werden verschiedene Bildpyramidenebenen genutzt, um das Ergebnis schrittweise zu verbessern. Als Eingangsdaten dienen mindestens zwei Bildstreifen, eine beobachtete äußere Orientierung und die Daten der geometrischen Kalibrierung der Kamera. Zusätzlich kann ein DGM als Näherungsinformation genutzt werden (Heipke et al., 2004).

Zunächst werden die Bildpyramiden aufgebaut, d.h. es werden aus den hoch aufgelösten Originalbildern Bilder mit verschiedenen niedrigeren Auflösungen berechnet. Beginnend mit den niedrigst aufgelösten Bildern (Startebene) werden beim Feature Based Matching (FBM) Punktmerkmale anhand bestimmter Kriterien aus den einzelnen Bildern extrahiert. Hierbei wird z.B. der sogenannte Förstner-Operator (Förstner, 1986) eingesetzt. Aus den so in verschiedenen Bildern gefundenen Punktmerkmalen werden nun durch paarweise Kombination der Punktmerkmale diejenigen gewonnen, die eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Der Kreuzkorrelationskoeffizient dient dabei als Ähnlichkeitsmaß. Um Mehrdeutigkeiten zu reduzieren, wird zusätzlich die geometrische Bedingung beachtet, dass die Strahlen, die von den Punktmerkmalen im Bildraum ausgehen, sich im Objektraum schneiden. Soll außerdem eine gleichmäßige Verteilung der homologen Punkte über den gesamten Bereich sichergestellt werden, so wird jedes Bild in Unterbereiche unterteilt und in diesen die Bildzuordnung unabhängig zu anderen Unterbereichen betrieben. Ist zusätzliche Näherungsinformation über den Objektraum z.B. ein DGM vorhanden, so muss sich der Schnittpunkt der Strahlen auf diesem DGM befinden.

Zur Optimierung der Ergebnisse des FBM wird ein Multi Image Least Squares Matching (MILSM) durchgeführt, mit dem die homologen Punkte in allen Bildern gleichzeitig gesucht werden (Krupnik, 1994). Dieses genauere Bildzuordnungsverfahren verbessert die Ergebnisse des FBM, erhöht aber gleichzeitig die Rechenzeit. Nach diesem Schritt werden aus den Bildkoordinaten der homologen Punkte Modellpunkte berechnet. Diese dienen im nächst höheren Pyramidenlevel als Näherungsinformation.

Von der Startpyramide bis zu einer mittleren Auflösung wird das FBM in den gesamten Bildern durchgeführt. Bewegt man sich auf der Bildpyramide nach unten, steigen sowohl die Bildgrößen als auch die Anzahl der extrahierten Features. Um Rechenzeit zu sparen, werden korrespondierende Punkte unterhalb der Zwischenebene lediglich in kleinen Bildbereichen („Image Chips") gesucht, in denen aufgrund guter Textur schon vorher Punkte gefunden wurden (Tang und Heipke, 1996). Das MILSM Bildzuordnungsverfahren kann auf allen Pyramidenebenen angewandt werden. Um die Rechenzeit zu reduzieren, ist es sinnvoll, dieses Verfahren nicht auf allen Pyramidenebenen, sondern nur auf der untersten Ebene (Originalauflösung) durchzuführen.

3.1.3 Ausgleichungsmodell

In der Bündelausgleichung wird ein von Hofmann et al. (1982) entwickeltes Konzept genutzt, welches in verschiedenen Arbeiten z.B. von Müller (1991), Ohlhof (1996) und Kornus (1999) aufgegriffen und erweitert wurde. Der Ansatz schätzt die Parameter der äußeren Orientierung nur zu diskreten Zeitpunkten für sogenannte Orientierungspunkte. Die äußere Orientierung für die zwischen den Orientierungspunkten liegenden Zeilenenbilder wird über stückweise Polynome dargestellt. Hierbei dienen die Funktionswerte der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten als Stützstellen für die Polynome. Das mathematische Modell der photogrammetrischen Punktbestimmung mit einer Dreizeilenkamera basiert auf den Kollinearitätsgleichungen. Sie beschreiben den grundlegenden geometrischen Zusammenhang zwischen Bild- und Objektraum; d.h. die durch die korrespondierenden

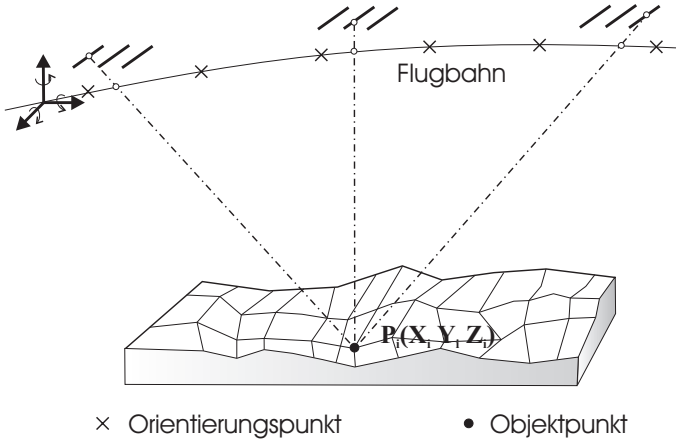


Abbildung 3.2. Strahlengeometrie einer Dreizeilenkamera

Bildpunkte und die Projektionszentren aufgespannten Strahlen schneiden sich in einem Objektpunkt (siehe Abbildung 3.2).

Für alle Bildpunkte müssen jeweils zwei Kollinearitätsgleichungen aufgestellt werden. Da für die Bestimmung eines Objektpunkts mindestens zwei Bildpunkte aus unterschiedlichen Sensoren benötigt werden, ergibt dies mindestens vier Kollinearitätsgleichungen pro Objektpunkt. Die Anzahl der Kollinearitätsgleichungen pro Objektpunkt erhöht sich, wenn für mehr als zwei Sensoren Bildkoordinaten für diesen Objektpunkt vorliegen.

Zur Schätzung der Unbekannten wird eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung genutzt. Die Unbekannten können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Zum einen sind dies die Parameter der äußeren Orientierung an den wenigen Orientierungspunkten und zum anderen die Koordinaten der Objektpunkte. Die Beobachtungen sind die Bildkoordinaten der Objektpunkte. Die Kollinearitätsgleichungen liegen in einer nicht-linearen Form vor und müssen deshalb durch eine Taylor-Entwicklung linearisiert werden. Aus diesem Grund werden in der Bündelausgleichung Näherungswerte für die Parameter der äußeren Orientierung und für die Objektpunkte benötigt.

3.2 Dreizeilenkameras

Neben der im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen HRSC gibt es weitere Kameras, die nach dem Push-Broom-Prinzip arbeiten und aus mindestens 3 Zeilen bestehen. Diese Kameras unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der Anzahl der Pixel pro Sensor, in den unterschiedlichen Stereowinkeln und in der Anzahl der Objektive.

Eine der ersten Dreizeilenkameras war der vom DLR in Zusammenarbeit mit der indischen Raumfahrtorganisation (ISRO) entwickelte MEOSS (Monocular Electro-Optical Stereo Scanner) (Lanzl, 1986). Mit MEOSS wurden allerdings nur einige Testflüge in Flugzeugen vorgenommen, da bei zwei fehlgeschlagenen Startversuchen der Satelliten 1988 und 1993 beide Kameras verloren gingen. Bekannter ist MOMS (Modular Optoelectronic Multispectral Stereo Scanner), der zweimal erfolgreich im Weltraum zum Einsatz kam (Ackermann et al., 1989). Als erste Dreizeilenkamera im Weltraum überhaupt wurde MOMS-02/D2 im Frühjahr 1993 bei der zweiten deutschen NASA Space Shuttle Mission für 10 Tage betrieben. Ein zweites Mal kam die Kamera nach einer Neukalibrierung ab Anfang 1996 im PRIRODA Modul der russischen Raumstation MIR unter dem Namen MOMS-2P für mehrere Monate zum Einsatz (Kornus, 1999).

Etwa zeitgleich mit MOMS wurde Ende der 1980er Jahre von der DASA (Deutsche Aerospace AG) die DPA (Digitale Photogrammetrie-Ausstattung) für den Flugzeugeinsatz entwickelt und getestet (Hofmann et al., 1993). Zum Einsatz kam die Kamera aber nie. Seit 1997 sind in zahlreichen Projekten weitere, vom Design leicht modifizierte HRSCs, unter dem Namen HRSC-A, HRSC-AX und HRSC-AXW im Flugzeugeinsatz (Wewel et al., 1998; Neukum, 1999; Scholten et al., 2002). Ebenfalls für den Einbau in ein Flugzeug entwickelte Leica Geosystems, Heerbrugg die ADS40 (Airborne Digital

Sensor). Von Starlabo, Tokyo in Zusammenarbeit mit dem Institute of Industrial Science der Universität Tokyo wurde die TLS (Three-Line-Scanner) entwickelt (Chen et al., 2003; Tsuno et al., 2004). Standardmäßig wird dieses System auf einem Hubschrauber montiert, aber auch der Betrieb auf einer Flugzeugplattform ist möglich.

Diese Kameras erbringen sowohl im Flugzeugeinsatz als auch im Weltraum den Nachweis für den inzwischen immer höher werdenden Stellenwert der 3-Zeilen-Technologie. Besonders die Weiterentwicklungen der HRSC zeigen klar, dass es sich bei der auf der Mars Express Mission verwendeten HRSC um ein robustes und zuverlässiges Kamerakonzept mit hervorragenden optischen und geometrischen Eigenschaften handelt.

3.3 Orbitmodellierung mittels Keplerelementen

Bei Satellitenbahnen scheint es sinnvoll, direkt die Parameter der physikalischen Bahn, d.h den Epoche-Zustandsvektor in Form von Keplerelementen zu verbessern. Diese Möglichkeit wurde u.a. im Rahmen eines OEEPE-Tests untersucht. Während einige Gruppen für die Auswertung der einzelnen SPOT-Stereoszene Polynomansätze verwendeten, nutzten andere Gruppen bahndynamische Ansätze. Mit beiden Ansätze konnten annähernd gleiche Genauigkeiten erziehlt werden (Dowman et al., 1991).

Im Vorfeld der Mars 96 Mission wurde die Verwendung des Epoche-Zustandsvektors in der Bündelausgleichung ebenfalls ausführlich untersucht und die Kollinearitätsgleichungen wurden dementsprechend modifiziert (Ohlhof, 1996). Es wurden folgende Nachteile angegeben, die entstehen, wenn keine bahndynamischen Bedingungen genutzt werden:

- Die physikalische Beziehung zwischen den Positionen aufeinander folgender Orientierungspunkte wird ignoriert, da die Bahn über stückweise Polynome interpoliert wird.
- Die geschätzten Bahnparameter in der Bündelausgleichung bieten keine unmittelbare Interpretation in Form von physikalischen Parametern.

Trotz dieser Nachteile wurden in der MOMS-02/D2 Mission mit konventionellen Ansätzen (siehe Abschnitt 3.1.3) gute Ergebnisse erzielt (Kornus, 1999). Im Gegensatz zur MOMS-02/D2 Mission waren bei der Mars 96 Mission einige Randbedingungen ungünstiger (Ohlhof, 1996):

- In dem stark elliptischen Orbit werden lange Bildstreifen aufgenommen, die im Extremfall bei Aufnahmen mit WAOSS von Pol zu Pol reichen können.
- Die vorhandenen Passpunktnetze und das Mars DGM haben eine niedrige Genauigkeit und Navigationssysteme wie GPS oder INS stehen nicht zur Verfügung.
- Die Positionsgenauigkeit aus der Bahnbestimmung ist wegen der eingeschränkten Trackingmöglichkeiten und der vergleichsweise ungenauen Kenntnis des Gravitationsfelds mindestens eine Größenordnung schlechter als die Genauigkeit der homologen Punkte.
- Die Oberfläche des Mars weist in weiten Teilen eine schwache Textur auf.

Für Mars Express sind die meisten der angegebenen Gründe nicht mehr relevant: WAOSS ist nicht an Bord, das Mars DGM ist durch das MOLA DGM viel genauer und die von der ESA zur Verfügung gestellten Bahndaten sind wegen des mittlerweile viel besser bekannten Gravitationsfelds nicht mehr so ungenau. Die Oberfläche des Mars weist nur in lokal begrenzten Gebieten schwache Texturen auf. Problematisch ist, dass teilweise die HRSC Streifen zu kurz sind, um Keplerelemente zuverlässig bestimmen zu können.

3.4 Passinformation zur Datumsfestlegung

Im Allgemeinen werden in der Photogrammetrie Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte und die Parameter der inneren Orientierung benötigt. Zur Datumsfestlegung und zur Vermeidung von Blockverbiegungen werden zusätzlich die Parameter der äußeren Orientierung gebraucht, die normalerweise mit Hilfe von Passinformation in Form von Passpunkten in einer Bündelausgleichung geschätzt werden. In jüngerer Zeit wird immer häufiger die Methode der „direkten Georeferenzierung“ verwendet, wobei die Parameter der äußeren Orientierung bei der Aufnahme der Bilder direkt aus GPS- und INS-Messungen bestimmt werden (Heipke et al., 2001; Jacobsen, 2004).

Am Mars ist eine direkte Beobachtung der äußeren Orientierung mit GPS/INS nicht möglich. Zwar sind eine geringe Anzahl von Passpunkten am Mars vorhanden, diese wurden allerdings aus Daten früherer Marsmissionen bestimmt und haben somit nur eine begrenzte Genauigkeit (Zeitler, 1999; Zeitler et al., 2000). Bei den Arbeiten des USGS für das Mars Digital Image Model 2.1 Control Network wurden die aus Mariner 9 und Viking Daten generierten 37652 Passpunkte mit MOLA Daten verbessert. Zusätzlich kamen 1232 neue Passpunkte hinzu (Archinal et al., 2004). Dies ergibt bei einer durchschnittlichen Länge eines HRSC Streifens maximal 5 Passpunkte pro Streifen.

Diese Anzahl der Passpunkte pro HRSC Streifen ist für eine Anpassung der HRSC Daten an das Referenzsystem viel zu gering, ganz besonders, da es sich bei der HRSC um eine Zeilenkamera handelt. Demnach ist anders geartete Passinformation, z.B. in Form eines DGM notwendig, um die durch die photogrammetrische Punktbestimmung abgeleiteten Objektpunkte in ein vorhandenes Referenzsystem einzupassen. Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, die derartige Passinformation zur photogrammetrischen Punktbestimmung verwenden.

3.4.1 Verwendung von Oberflächen als Passinformation

Die ersten Arbeiten zur Bestimmung der absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blocks in der Luftbildphotogrammetrie unter Zuhilfenahme eines DGMs wurden von Ebner und Müller (1986) im Zusammenhang mit Simulationsstudien für Dreizeilenkameras durchgeführt. Fortgeführt wurden diese Arbeiten durch Ebner und Strunz (1988) und Strunz (1993), die das mathematische Modell für die Nutzung eines DGMs in der Luftbildphotogrammetrie als zusätzliche oder ausschließliche Passinformation detaillierter beschreiben. Des Weiteren wurde mit Hilfe von Simulationen analysiert, wie sich verschiedene Neigungen des Geländes und die Anzahl der verwendeten Objektpunkte auf die Schätzbarkeit der Parameter der äußeren Orientierung auswirken.

Der Ansatz beruht auf einer gemeinsamen Kleinste-Quadrate-Ausgleichung, in der mit zusätzlichen Beobachtungsgleichungen die Höhendifferenz zwischen Objektpunkten, die in den Bildern identifiziert sind, und der DGM Oberfläche minimiert wird. Da sich nach jeder Iteration die äußere Orientierung und somit auch die Objektpunkte ändern, müssen die Punkte aus dem DGM jedes Mal neu interpoliert werden. Die Simulationen ergaben, dass sich die Lagegenauigkeit der Objektpunkte mit zunehmender Geländeneigung, steigender Anzahl von Objektpunkten und steigender DGM Genauigkeit verbessert. Die Höhengenauigkeit wird nicht von der Geländeneigung, sondern nur von der Genauigkeit des DGMs und der Anzahl der Objektpunkte beeinflusst.

Etwa zeitgleich präsentierten Rosenholm und Torlegård (1988) ähnliche Arbeiten, in denen die Parameter der äußeren Orientierung mit Hilfe eines DGMs verbessert werden. Ausgewertet wurden mehrere Testgebiete in Schweden. Die Ergebnisse zeigten, dass in den meisten Fällen eine höhere Höhengenauigkeit als mit herkömmlichen Methoden erreicht wurde. An den Beispielen wurde ebenfalls gezeigt, dass die Lagegenauigkeit von der Geländeneigung abhängt.

Weitere Ansätze zur Bestimmung der Orientierungsparameter von Stereobildern werden von Oda et al. (2000) oder Buckley et al. (2004) vorgestellt. Diese Konzepte basieren darauf, die sechs Parameter der äußeren Orientierung jedes einzelnen Bildes des Stereopaars so zu verbessern, dass alle Objektpunkte bestmöglich an ein DGM angepasst sind. Auch diese Ansätze benötigen keine klassischen Passpunkte.

Einen Ansatz zur Nutzung von unregelmäßig verteilten, nicht in den Bildern identifizierbaren Passpunkten als Passinformation stellten Ebner und Ohlhof (1994) vor. Auch dieser kommt ohne klassische Passpunkte zur Punktbestimmung aus. Die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte werden derart gewählt, dass deren drei Objektpunkte in der Umgebung eines nicht in den Bildern identifizierten Passpunkts liegen. Außerdem wird angenommen, dass der Passpunkt auf einer, durch die Objektpunkte gebildeten Ebene liegt. Das mathematische Modell der Bündelausgleichung beinhaltet drei zusätzliche Beobachtungsgleichungen und eine Bedingungsgleichung. In der Bedingungsgleichung ist formuliert, dass der nicht in den Bildern identifizierte Passpunkt auf der durch die Objektpunkte gebildeten geneigten Ebene liegt.

Von Ebner und Ohlhof (1994) wurden außerdem Simulationen zur Bewertung des Ansatzes mit zusätzlicher und ausschließlicher Nutzung dieser Passinformation durchgeführt. Die Simulationen basieren auf einem Block aus 121 Luftbildern. Vier verschiedene Fälle wurden untersucht: In einem Fall wurden in einer klassischen Blocktriangulierung 20 konventionelle Vollpasspunkte und 16 Höhenpasspunkte verwendet. Im zweiten Fall wurden die 16 Höhenpasspunkte durch 16 nicht in den Bildern identifizierte Passpunkte ersetzt. Es zeigte sich, dass die Höhenpasspunkte ohne Genauigkeitsverlust ersetzt werden können. Im dritten Fall werden nur 4 Vollpasspunkte und zusätzlich 32 nicht in den Bildern identifizierte Passpunkte verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhenpasspunkte ohne Genauigkeitsverlust ersetzt werden können, allerdings die Lagegenauigkeit etwas schlechter wird. Im vierten Fall werden alle konventionellen Passpunkte durch 36 nicht in den Bildern identifizierte Passpunkte ersetzt. Wieder zeigen die Ergebnisse eine ähnliche Höhengenauigkeit wie in den anderen Fällen. Die Lagegenauigkeit hingegen steigt mit zunehmender Geländeneigung.

Einen ähnlichen Ansatz, in dem Oberflächeninformation in eine Aerotriangulation integriert wird, beschreibt Jaw (2000). In dem Ansatz wird jeweils wieder aus drei nicht in den Bildern identifizierten Passpunkten eine Ebene gebildet und die Distanz zwischen der Ebene und den, mittels photogrammetrischer Methoden, ermittelten Objektpunkten entlang der Oberflächennormale minimiert. Die Passpunkte stammen in diesem Fall von einem flugzeuggetragenen Laserscanner. Die Bildkoordinaten der Objektpunkte werden in den Bildern entweder manuell gemessen oder automatisch von einem Bildzuordnungsprogramm erzeugt. Ziel ist es, konventionelle Passpunkte zu ersetzen. Ebenfalls nimmt der Fusionierungsaspekt von Laserscannerdaten mit photogrammetrischen Objektpunkten in der Arbeit einen hohen Stellenwert ein, da sich in jüngster Zeit immer mehr Arbeiten mit der Fusionierung von photogrammetrischen Daten und nicht in den Bildern sichtbaren Punktwolken beschäftigen. Gewonnen werden die Punktwolken in diesen Arbeiten meist aus Laserscanner- oder GPS-Messungen (Gruen und Akca, 2005).

Ein Ansatz von Yoon und Shan (2005) beschreibt ein Verfahren zur Verbesserung der Parameter der äußeren Orientierung von MOC Bildern der MGS Mission durch Einbeziehung von MOLA als Passinformation. Auch hier besteht das Problem, dass die MOLA Spurpunkte in den Bildern nicht sichtbar sind. Da diese aber in einer Bündelausgleichung als gewöhnliche Passpunkte genutzt werden sollen, müssen die MOLA Profilpunkte in einem Vorverarbeitungsschritt in die Bilder transformiert und Bildkoordinaten generiert werden (Shan et al., 2005).

Bei der Ausgleichung selbst handelt es sich um eine kombinierte Bündelausgleichung, in die MOLA Entfernungsmessungen, Objektpunktkoordinaten der MOLA Profilpunkte, äußere Orientierung der MOC Bilder, Bildkoordinaten der projizierten MOLA Spurpunkte und Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte zwischen den Stereopaaren der MOC Bilder Eingang finden. Als Beobachtungen gehen über die Kollinearitätsgleichungen in die Ausgleichung die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte und die Bildkoordinaten der projizierten MOLA Profilpunkte ein. Während die a priori Genauigkeiten für die erstgenannten mit Standardabweichungen von einem Pixel eingeführt werden, basieren die a priori Standardabweichungen der Bildkoordinaten der MOLA Profilpunkte auf empirisch ermittelten Werten, die bei etwa 30 Pixeln liegen. Die sechs Parameter der äußeren Orientierung werden über ein Polynom zweiter Ordnung formuliert.

Als Unbekannte treten in der Ausgleichung die Koeffizienten des Polynoms auf. Ebenfalls gehen die

MOLA Entfernungsmessungen als Beobachtungen in die Bündelausgleichung ein und werden als euklidische Distanz zwischen der Position der MOC und den MOLA Profilpunkten formuliert. Als Genauigkeit werden Standardabweichungen von 10 m angesetzt. Die Koordinaten der MOLA Profilpunkte werden als normale Passpunkte mit relativ hoher Genauigkeit von 10 m für alle drei Koordinaten X, Y und Z eingebracht. Ergebnis ist eine verbesserte äußere Orientierung der MOC Bilder und Objektpunktkoordinaten der Verknüpfungspunkte, die als freie Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt werden.

Kim et al. (2000) stellen einen Ansatz vor, in dem automatisch Merkmale, wie sichtbare Kanten, Einschlagkrater und kleinere Hügel detektiert werden. Mit einem hierarchisch und heuristisch arbeitenden Algorithmus werden die Merkmale den MOLA Profildaten zugeordnet. Können Merkmale aus MOC Bildern in den MOLA Profildaten detektiert werden, so dienen diese als 3D Passpunkte in einer nachfolgenden Bündelausgleichung. Zur großräumigen Anwendung ist der Ansatz jedoch nicht geeignet, da viele falsche Merkmale zugeordnet werden. Dieses Verfahren kann deshalb nur als halbautomatisch bezeichnet werden.

3.4.2 Folgerungen

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Ansätze zur Verwendung von Oberflächen als Passinformation verfolgen mit verschiedenen Strategien alle das gleiche Ziel: Die Anpassung von photogrammetrisch bestimmten Objektpunkten an nicht in den Bildern identifizierbare Passinformation zur Schätzung bzw. Verbesserung der äußeren Orientierung dieser Bilder.

Mit der Zuordnung von Mars Bilddaten und MOLA Daten beschäftigen sich die beiden zuletzt vorgestellten Ansätze. Leider kann kein Gebrauch von diesen Verfahren gemacht werden, da in einem Fall (Yoon und Shan, 2005) die rohen Entfernungsmessungen des MOLA Instruments genutzt werden und diese im Fall der Mars Express Mission nicht vorhanden sind. Der zweite Ansatz (Kim et al., 2000) könnte zwar theoretisch auch im Fall Mars Express eingesetzt werden. Allerdings arbeitet der Ansatz nur halbautomatisch und verwendet zudem die MOLA Profildaten, d.h. Daten die in einigen Fällen grobe Fehler aufweisen (siehe Abschnitt 2.2.3.5). Im MOLA DGM finden sich, im Vergleich zu den MOLA Profildaten, praktisch keine groben Fehler. Aus diesem Grund soll im Rahmen der Mars Express Mission das MOLA DGM als Passinformation genutzt werden.

Der Ansatz von Ebner und Ohlhof (1994) geht davon aus, dass eine größere Anzahl photogrammetrisch abgeleiteter Objektpunkte als nicht in den Bildern identifizierbarer Passpunkte vorhanden ist. Die von Ebner und Müller (1986); Ebner und Strunz (1988); Strunz (1993) vorgestellten Ansätze hingegen nutzen DGM Gitterpunkte als nicht in den Bildern identifizierbare Passpunkte und gehen davon aus, dass eine geringere Anzahl an photogrammetrisch abgeleiteten Objektpunkten als DGM Gitterpunkte vorhanden sind.

In der Mars Express Mission gibt es, mit Ausnahme an Nord- und Südpol, zu jedem photogrammetrisch abgeleiteten Objektpunkt vier umliegende MOLA DGM Gitterpunkte. Aus diesem Grund dient der zuletzt von Strunz (1993) veröffentlichte Ansatz als Grundlage für den in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz. Da der Ansatz auf Basis von Flächenbildern entwickelt und evaluiert wurde, ist allerdings eine Integration in eine mit HRSC Zeilenbildern arbeitende Bündelausgleichung erforderlich.

4. Kombinierte Ausgleichung von HRSC- und MOLA Daten

Anknüpfend an das in Abschnitt 3.1.3 beschriebene mathematische Modell zur photogrammetrischen Auswertung von Zeilenbilddaten wird in diesem Kapitel das verwendete Funktionalmodell für die Bündelausgleichung der Mars HRSC Bilddaten eingehender dargestellt. Zum Aufbau einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell werden zunächst die bekannten Kollinearitätsgleichungen erweitert und zusätzliche Beobachtungsgleichungen eingeführt, um systematische Effekte der Navigationsdaten zu beheben. Des Weiteren wird auf die Nutzung von MOLA Daten als Passinformation und auf die Schätzung der inneren Orientierung einer Dreizeilenkamera eingegangen.

4.1 Bildkoordinatensystem

Das Bildkoordinatensystem wurde in der Laborkalibrierung durch die Messungen der Pixel jedes Sensors definiert (siehe Abschnitt 2.3.2.3). Die Ergebnisse legen die absolute Position jedes einzelnen Pixels auf der fiktiven Fokalebene fest. Während die y-Achse parallel zu den Sensoren verläuft, liegt die x-Achse orthogonal zu der y-Achse ebenfalls auf der fiktiven Fokalebene. Die z-Achse zu diesem rechtsdrehenden Koordinatensystem steht senkrecht auf der fiktiven Fokalebene (siehe Abbildung 4.1).

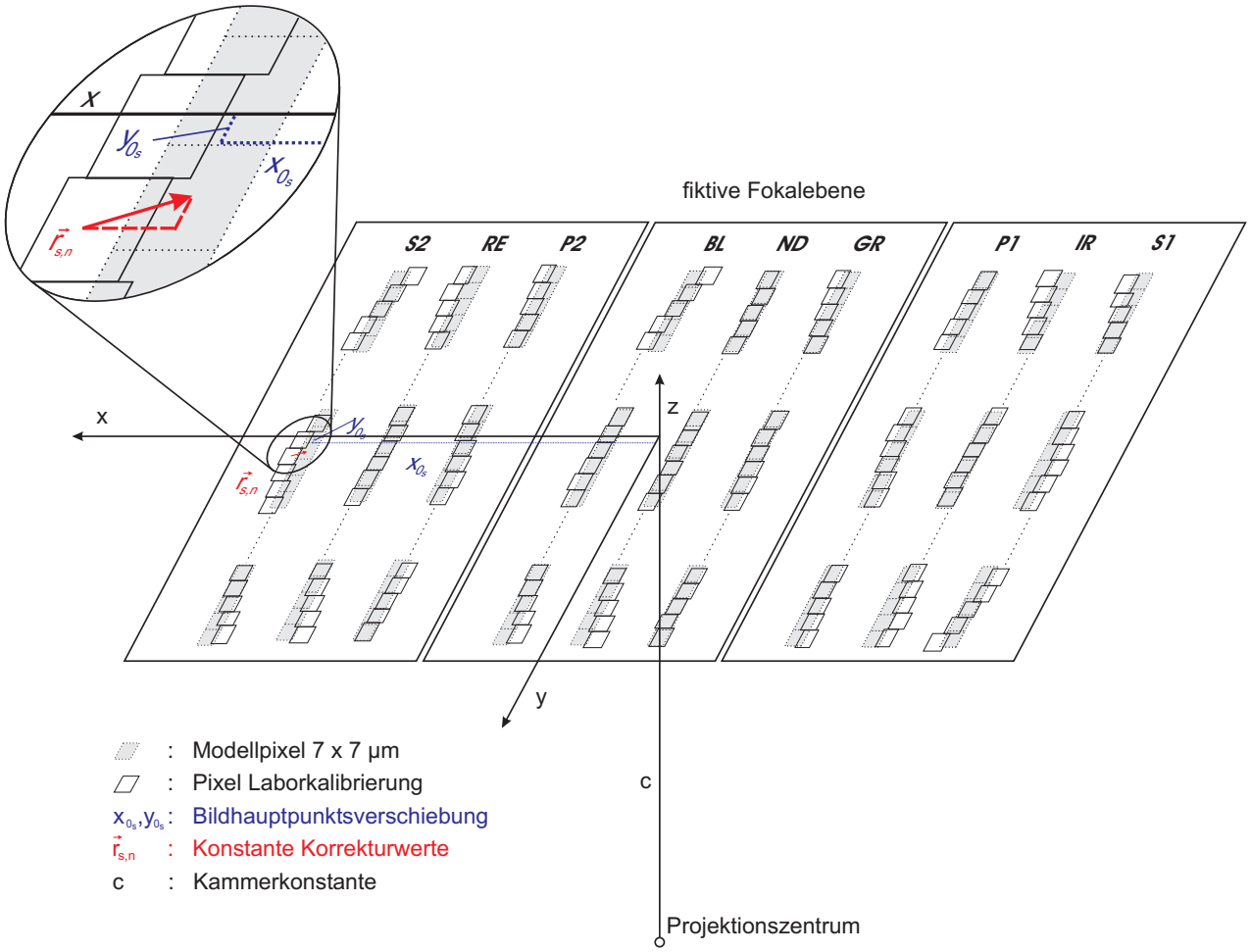


Abbildung 4.1. Bildkoordinatensystem der HRSC (schematisch)

Für das mathematische Modell ist es zunächst notwendig, die innere Orientierung zu definieren. Dafür werden für jeden Sensor drei Parameter für die innere Orientierung aus den Werten der Laborkalibrierung bestimmt. Dies sind zum einen pro Sensor s die zwei Parameter der Hauptpunktsverschiebung x_{0_s} und y_{0_s}, die durch einfache arithmetische Mittelwertbildung aller in der Laborkalibrierung bestimmten

Pixelpositionen des jeweiligen Sensors berechnet werden. Weiterhin werden für jedes einzelne Sensorelement durch Differenzbildung konstante Korrekturwerte $\vec{r}_{s,n}$ bestimmt, die zwischen den aus den Parametern der inneren Orientierung berechneten Modellpixeln und der Laborkalibrierung bestehen. Diese, für jedes Pixel konstanten Korrekturwerte $\vec{r}_{s,n}$ werden vor der Ausgleichung an den jeweiligen Bildkoordinaten der zugeordneten Punkte angebracht. Der dritte Parameter c gibt den Abstand zwischen mathematischem Projektionszentrum und der fiktiven Fokalebene an. Da die Werte der Hauptpunktsverschiebung x_{0_s} und y_{0_s} und die konstanten Korrekturwerte $\vec{r}_{s,n}$ in der fiktiven Fokalebene berechnet werden, wird die für die fiktive Fokalebene gültige und für alle Sensoren gleiche Brennweite aus der Laborkalibrierung als Kammerkonstante c übernommen.

4.2 Kollinearitätsgleichungen

Grundlage des funktionalen Modells für eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell sind die in Abschnitt 3.1.3 angesprochenen Kollinearitätsgleichungen (4.1), die den Zusammenhang zwischen beobachteten Bildkoordinaten x_{ij_ks}, y_{ij_ks}, den unbekannten Objektpunktkoordinaten $\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$ der Punkte P_i und den unbekannten Parametern der äußeren Orientierung $\hat{X}_{j_k}, \hat{Y}_{j_k}, \hat{Z}_{j_k}$ unter Berücksichtigung der Parameter der, zunächst konstanten, inneren Orientierung x_{0s}, y_{0s}, c formulieren.

$$\begin{aligned} x_{ij_ks} + x_{0_s} + \hat{v}_{x_{ij_ks}} &= c\,\frac{\hat{r}_{j_k11}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k21}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k31}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})}{\hat{r}_{j_k13}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})} \\ y_{ij_ks} + y_{0_s} + \hat{v}_{y_{ij_ks}} &= c\,\frac{\hat{r}_{j_k12}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k22}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k32}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})}{\hat{r}_{j_k13}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})} \end{aligned} \tag{4.1}$$

mit

x_{ij_ks}, y_{ij_ks}	:	in Zeilenbild j des Sensors s beobachtete Bildkoordinaten des Objektpunkts P_i in Streifen k
$\hat{v}_{x_{ij_ks}}, \hat{v}_{y_{ij_ks}}$	:	Verbesserungen der Bildkoordinaten
$\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$	:	Koordinaten des Objektpunkts P_i
$\hat{X}_{j_k}, \hat{Y}_{j_k}, \hat{Z}_{j_k}$	:	Koordinaten des Projektionszentrums des Zeilenbildes j in Streifen k
$\hat{r}_{j_k11}, ..., \hat{r}_{j_k33}$	:	Elemente der Rotationsmatrix R_{j_k} (Gleichung (4.2))
x_{0_s}, y_{0_s}, c	:	Konstante Parameter der inneren Orientierung für jeden Sensor s

Die Rotationsmatrix R_{j_k} beschreibt die Orientierung des Bildkoordinatensystems in Bezug auf das Objektkoordinatensystem. Sie lautet für φ als Primär-, ω als Sekundär- und κ als Tertiärdrehung:

$$R_{j_k} = \begin{bmatrix} cos\,\hat{\varphi}_{j_k}\ cos\,\hat{\kappa}_{j_k} + sin\,\hat{\varphi}_{j_k}\ sin\,\hat{\omega}_{j_k}\ sin\,\hat{\kappa}_{j_k} & -cos\,\hat{\varphi}_{j_k}\ sin\,\hat{\kappa}_{j_k} + sin\,\hat{\varphi}_{j_k}\ sin\,\hat{\omega}_{j_k}\ cos\,\hat{\kappa}_{j_k} & sin\,\hat{\varphi}_{j_k}\ cos\,\hat{\omega}_{j_k} \\ cos\,\hat{\omega}_{j_k}\ sin\,\hat{\kappa}_{j_k} & cos\,\hat{\omega}_{j_k}\ cos\,\hat{\kappa}_{j_k} & -sin\,\hat{\omega}_{j_k} \\ -sin\,\hat{\varphi}_{j_k}\ cos\,\hat{\kappa}_{j_k} + cos\,\hat{\varphi}_{j_k}\ sin\,\hat{\omega}_{j_k}\ sin\,\hat{\kappa}_{j_k} & sin\,\hat{\varphi}_{j_k}\ sin\,\hat{\kappa}_{j_k} + cos\,\hat{\varphi}_{j_k}\ sin\,\hat{\omega}_{j_k}\ cos\,\hat{\kappa}_{j_k} & cos\,\hat{\varphi}_{j_k}\ cos\,\hat{\omega}_{j_k} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Grundsätzlich werden für jedes Bildkoordinatenpaar die Kollinearitätsgleichungen aufgestellt. Allerdings ergibt sich aus den Kollinearitätsgleichungen (4.1), dass für jedes Zeilenbild für welches Kollinearitätsgleichungen aufgestellt werden, d.h. Bildkoordinaten vorhanden sind, die sechs unbekannten Parameter $\hat{X}_{j_k}, \hat{Y}_{j_k}, \hat{Z}_{j_k}, \hat{\varphi}_{j_k}, \hat{\omega}_{j_k}, \hat{\kappa}_{j_k}$ der äußeren Orientierung geschätzt werden müssten. Dies ist aus Gründen der geometrischen Unbestimmbarkeit und des hohen Rechenaufwands nicht möglich. Es wird daher die Annahme getroffen, dass sich die Parameter der äußeren Orientierung innerhalb begrenzter Zeitintervalle nach bestimmten Mustern ändern, die modelliert werden können. So wird die äußere Orientierung nicht mehr für jedes Zeilebild explizit, sondern nur zu bestimmten Zeitpunkten, an den

sogenannten Orientierungspunkten geschätzt. Die Länge des zwischen den Orientierungspunkten liegenden Zeitintervalls bzw. deren räumlicher Abstand hängt u.a. vom Flugverhalten des Kameraträgers ab.
Werden in den Kollinearitätsgleichungen die Parameter der äußeren Orientierung für dazwischen liegende Zeilenbilder benötigt, müssen diese über eine Funktion aus den Werten an den Orientierungspunkten berechnet werden. Da Satellitenbahnen relativ glatt sind, haben sich als Funktionen stückweise Polynome z.B. Basis-Splines oder Lagrange-Polynome als besonders geeignet erwiesen. Aus rein praktischen Überlegungen werden Lagrange-Polynome vom Grad 3 genutzt (Gleichung (4.3)). Ihr Vorteil liegt darin, dass an den Orientierungspunkten die Parameter der äußeren Orientierung direkt als Unbekannte auftreten, wodurch eine Rückrechnung der Orientierungsparameter vereinfacht wird (Kornus, 1999). Die Nutzung von Lagrange-Polynomen vom Grad 3 setzt allerdings voraus, dass pro Streifen mindestens vier Orientierungspunkte vorhanden sind. Gleichung (4.3) zeigt das Lagrange-Polynom vom Grad 3 für den Parameter $\hat{X}_{j_k}$. Die Lagrange-Polynome für die Parameter $\hat{Y}_{j_k}$, $\hat{Z}_{j_k}$, $\hat{\varphi}_{j_k}$, $\hat{\omega}_{j_k}$, $\hat{\kappa}_{j_k}$ sind analog zu dieser Gleichung aufgebaut.

$$
\begin{aligned}
\hat{X}_{j_k} &= \hat{X}_{(m-1)_k} \; \frac{(j_k-m_k)\,(j_k-(m+1)_k)\,(j_k-(m+2)_k)}{((m-1)_k-m_k)\,(m-1)_k-(m+1)_k)\,(m-1)_k-(m+2)_k)} \; + \\
&+ \hat{X}_{m_k} \; \frac{(j_k-(m-1)_k)\,(j_k-(m+1)_k)\,(j_k-(m+2)_k)}{(m_k-(m-1)_k)\,m_k-(m+1)_k)\,m_k-(m+2)_k)} \; + \\
&+ \hat{X}_{(m+1)_k} \; \frac{(j_k-(m-1)_k)\,(j_k-m_k)\,(j_k-(m+2)_k)}{((m+1)_k-(m-1)_k)\,(m+1)_k-m_k)\,(m+1)_k-(m+2)_k)} \; + \\
&+ \hat{X}_{(m+2)_k} \; \frac{(j_k-(m-1)_k)\,(j_k-m_k)\,(j_k-(m+1)_k)}{((m+2)_k-(m-1)_k)\,(m+2)_k-m_k)\,(m+21)_k-(m+1)_k)}
\end{aligned}
\tag{4.3}
$$

mit

$\hat{X}_{j_k}$	:	Unbekannte äußere Orientierung des Zeilenbildes j in Streifen k
$\hat{X}_{m_k}$	:	Unbekannte äußere Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
m_k	:	Zeilennummer des Orientierungspunkts in Streifen k
j_k	:	Nummer des Zeilebildes in Streifen k

Nach der Substitution von Gleichung (4.3) in Gleichung (4.1) ergeben sich die erweiterten Kollinearitätsgleichungen, die für mindestens vier Orientierungspunkte gelten und in einer allgemeinen Form in Gleichung (4.4) dargestellt sind.

$$
\begin{aligned}
x_{ij_ks} + x_{0_s} + \hat{v}_{x_{ij_k s}} = F_{imj_k} \quad & (\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i, \\
& \hat{X}_{(m-1)_k}, \hat{Y}_{(m-1)_k}, \hat{Z}_{(m-1)_k}, \hat{\varphi}_{(m-1)_k}, \hat{\omega}_{(m-1)_k}, \hat{\kappa}_{(m-1)_k}, \\
& \hat{X}_{m_k}, \hat{Y}_{m_k}, \hat{Z}_{m_k}, \hat{\varphi}_{m_k}, \hat{\omega}_{m_k}, \hat{\kappa}_{m_k}, \\
& \hat{X}_{(m+1)_k}, \hat{Y}_{(m+1)_k}, \hat{Z}_{(m+1)_k}, \hat{\varphi}_{(m+1)_k}, \hat{\omega}_{(m+1)_k}, \hat{\kappa}_{(m+1)_k}, \\
& \hat{X}_{(m+2)_k}, \hat{Y}_{(m+2)_k}, \hat{Z}_{(m+2)_k}, \hat{\varphi}_{(m+2)_k}, \hat{\omega}_{(m+2)_k}, \hat{\kappa}_{(m+2)_k}, \\
& j_k, m_k) \\
y_{ij_ks} + y_{0_s} + \hat{v}_{y_{ij_k s}} = F_{imj_k} \quad & (\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i, \\
& \hat{X}_{(m-1)_k}, \hat{Y}_{(m-1)_k}, \hat{Z}_{(m-1)_k}, \hat{\varphi}_{(m-1)_k}, \hat{\omega}_{(m-1)_k}, \hat{\kappa}_{(m-1)_k}, \\
& \hat{X}_{m_k}, \hat{Y}_{m_k}, \hat{Z}_{m_k}, \hat{\varphi}_{m_k}, \hat{\omega}_{m_k}, \hat{\kappa}_{m_k}, \\
& \hat{X}_{(m+1)_k}, \hat{Y}_{(m+1)_k}, \hat{Z}_{(m+1)_k}, \hat{\varphi}_{(m+1)_k}, \hat{\omega}_{(m+1)_k}, \hat{\kappa}_{(m+1)_k}, \\
& \hat{X}_{(m+2)_k}, \hat{Y}_{(m+2)_k}, \hat{Z}_{(m+2)_k}, \hat{\varphi}_{(m+2)_k}, \hat{\omega}_{(m+2)_k}, \hat{\kappa}_{(m+2)_k}, \\
& j_k, m_k)
\end{aligned}
\tag{4.4}
$$

In das stochastische Modell der Ausgleichung gehen die Standardabweichungen der beobachteten Bildkoordinaten als unkorreliert und gleich genau ein. Die Größen der Standardabweichungen ergeben sich aus der Bildzuordnung und werden in Abschnitt 5.1 eingehender beleuchtet.

4.3 Beobachtete Unbekannte

Hier wird unterstellt, dass für jedes Zeilebild beobachtete Parameter der äußeren Orientierung vorliegen. An den Orientierungspunkten können diese Beobachtungen in die Ausgleichung direkt eingeführt werden. Hierfür sind zusätzliche Beobachtungsgleichungen notwendig. In Gleichung (4.5) ist die Beobachtungsgleichung für den Parameter $\hat{X}_{m_k}$ des Orientierungspunkts m dargestellt. Die Beobachtungsgleichungen für die Parameter $\hat{Y}_{m_k}$, $\hat{Z}_{m_k}$, $\hat{\varphi}_{m_k}$, $\hat{\omega}_{m_k}$, $\hat{\kappa}_{m_k}$ sind analog zu dieser Gleichung aufgebaut.

$$\hat{v}_{X_{m_k}} = \hat{X}_{m_k} - X_{m_k} \tag{4.5}$$

mit

$\hat{v}_{X_{m_k}}$: Verbesserung der äußeren Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
$\hat{X}_{m_k}$: Unbekannte äußere Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
X_{m_k} : Beobachtete äußere Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k

Mit steigender Anzahl von Orientierungspunkten nimmt auch die Anzahl der beobachteten und der unbekannten Parameter der äußeren Orientierung zu. Auf die Redundanz hat dies jedoch keinen Einfluss, da für jeden zusätzlichen Orientierungspunkt sowohl sechs Unbekannte als auch sechs Beobachtungen eingeführt werden.
Die Bahn wird pro Orbit nur an wenigen Stellen gemessen, an denen die Kamera nicht in Betrieb ist. Aus physikalischen Gründen ist die Flugbahn eines Orbiters relativ glatt und wird im Wesentlichen nur vom Schwerefeld beeinflusst (siehe Abschnitt 2.3.3.1). Für die Aufnahmezeiträume wird die Bahn daher interpoliert und um das aus der MGS Mission relativ genau bekannte Schwerefeld korrigiert (siehe Abschnitt 2.2.4). Daher sind die Beobachtungen der Bahn hoch korreliert und weisen nur geringe zufällige Fehler auf, die durch die Genauigkeit des Schwerefelds hervorgerufen werden. An den Orientierungspunkten (X_{m_k}, Y_{m_k}, Z_{m_k}) können die Beobachtungen der Bahn deshalb als nahezu fehlerfrei in das stochastische Modell der Ausgleichung eingeführt werden. Auf die außerdem vorhandenen systematischen Effekte wird in Abschnitt 4.5 eingegangen. Die Lagedaten hingegen bestehen aus den kommandierten und nicht aus den tatsächlich eingestellten Lagewinkeln am Raumschiff. In das stochastische Modell gehen deshalb für die beobachteten Lagewinkel (φ_{m_k}, ω_{m_k}, κ_{m_k}) die vom ESOC gegebenen Genauigkeitswerte ein.

4.4 Zusätzliche Differenzen für jedes Zeilenbild

Wie bereits erwähnt, liegen für jedes Zeilenbild die beobachteten Parameter der äußeren Orientierung vor. Aus diesen beobachteten Parametern und den aus Gleichung 4.3 gewonnen Funktionswerten werden für jedes Zeilenbild vor der Ausgleichung einmalig durch Differenzbildung die Parameter (δX_{j_k}, δY_{j_k}, δZ_{j_k}, $\delta\varphi_{j_k}$, $\delta\omega_{j_k}$, $\delta\kappa_{j_k}$) berechnet (Müller, 1991). In die Ausgleichung fließen diese Differenzen als konstante Parameter ein. Hierfür muss Gleichung (4.3) um die konstanten Differenzen δX_{j_k} erweitert werden (Gleichung (4.6)). Die Parameter Y_{j_k}, Z_{j_k}, φ_{j_k}, ω_{j_k}, κ_{j_k} sind wieder analog zu dieser Gleichung aufgebaut.

$$\begin{aligned}
\hat{X}_{j_k} = {} & \hat{X}_{(m-1)_k} \; \frac{(j_k-m_k)\,(j_k-(m+1)_k)\,(j_k-(m+2)_k)}{((m-1)_k-m_k)\,((m-1)_k-(m+1)_k)\,((m-1)_k-(m+2)_k)} \; + \\
& + \; \hat{X}_{m_k} \; \frac{(j_k-(m-1)_k)\,(j_k-(m+1)_k)\,(j_k-(m+2)_k)}{(m_k-(m-1)_k)\,m_k-(m+1)_k)\,m_k-(m+2)_k)} \; + \\
& + \; \hat{X}_{(m+1)_k} \; \frac{(j_k-(m-1)_k)\,(j_k-m_k)\,(j_k-(m+2)_k)}{((m+1)_k-(m-1)_k)\,(m+1)_k-m_k)\,(m+1)_k-(m+2)_k)} \; + \\
& + \; \hat{X}_{(m+2)_k} \; \frac{(j_k-(m-1)_k)\,(j_k-m_k)\,(j_k-(m+1)_k)}{((m+2)_k-(m-1)_k)\,(m+2)_k-m_k)\,(m+21)_k-(m+1)_k)} \; + \\
& + \; \delta X_{j_k}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

mit

$\hat{X}_{j_k}$	:	Unbekannte äußere Orientierung des Zeilenbildes j in Streifen k
$\hat{X}_{m_k}$	:	Unbekannte äußere Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
δX_{j_k}	:	Differenzen zwischen beobachteter und interpolierter äußerer Orientierung
m_k	:	Zeilennummer des Orientierungspunkts in Streifen k
j_k	:	Nummer des Zeilebildes in Streifen k

Durch die Einführung der Differenzen werden Interpolationsfehler vermieden, die zwangsläufig eintreten, wenn eine gekrümmte Bahn, wie sie am Mars vorliegt, durch ein Polynom approximiert wird (siehe Abbildung 4.2).

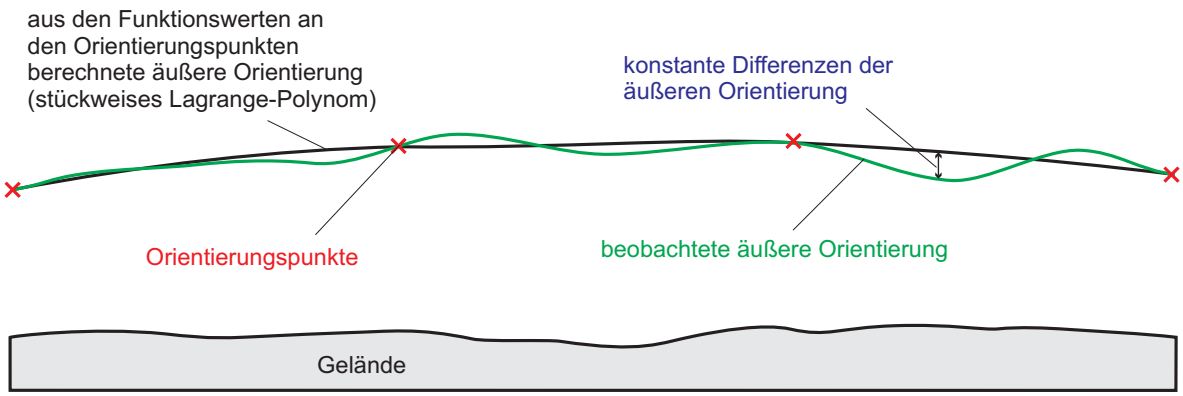


Abbildung 4.2. Differenzen δZ_{j_k}

Die Differenzen für die Bahn werden in die Ausgleichung als fehlerfrei eingeführt. Die kommandierten Lagewinkel können sehr gut durch stückweise Polynome approximiert werden, weshalb die verbleibenden Differenzen sehr klein ($< 0{,}01$ mgon) sind und keinen Einfluss auf die Berechnung der Unbekannten der äußeren Orientierung haben. Daher werden sie ebenfalls als fehlerfrei in die Ausgleichung eingeführt.

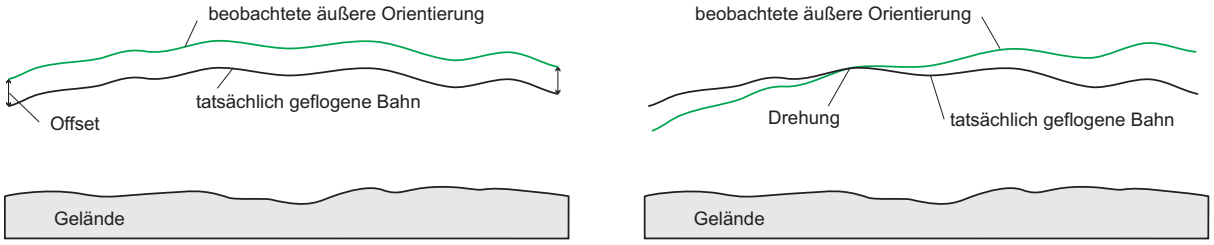
4.5 Systematische Effekte in den Parametern der äußeren Orientierung

In den Bahn- und Lagedaten treten neben zufälligen Fehlern der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung auch systematische Effekte auf.

4.5.1 Bahndaten

Die Dopplermessungen zur Bestimmung der Bahn finden vor und nach dem Aufnahmezeitraum der Bilder statt. Für den Zeitraum der Aufnahme der Bilddaten werden die Bahndaten interpoliert (siehe Abschnitt 2.3.3.1). Trotzdem können durch die wenigen Messungen pro Orbit systematische Effekte in den Bahndaten auftreten. Beschrieben werden können die Fehler z.B. durch Verschiebungen und/oder durch Drehungen der ganzen Bahn um die drei Drehachsen des Koordinatensystems. Abbildung 4.3(a) zeigt eine Verschiebung der Bahn in der Höhe. Eine Drehung der Bahn um die Y-Achse ist in Abbildung 4.3(b) dargestellt.

Ansätze zur Korrektur dieser systematischen Effekte sind möglich. So können die Fehler z.B. durch Bias (Nullpunktsverschiebung) und Drift modelliert werden, oder es steht die Orbitmodellierung mittels Keplerelementen zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.3).



(a) Offset (b) Drehung

Abbildung 4.3. Mögliche Differenzen zwischen geflogener und gemessener Bahn

4.5.1.1 Modellierung durch Bias und Drift

Die aufgezeigten systematischen Abweichungen in den Navigationsdaten werden durch die Einführung von zusätzlichen Unbekannten in die Bündelausgleichung erfasst. Hierfür muss Gleichung (4.5) erweitert werden, um für die Parameter der Bahn pro Streifen einen Bias und eine lineare Drift anzusetzen. In Gleichung (4.7) ist dies für den Parameter $\hat{X}_{m_k}$ des Orientierungspunkts m dargestellt. Die Beobachtungsgleichungen für die Parameter $\hat{Y}_{m_k}$, $\hat{Z}_{m_k}$ sind analog zu dieser Gleichung aufgebaut.

$$\hat{v}_{X_{m_k}} = \hat{X}_{m_k} - X_{m_k} + \hat{X}_{B_k} + j_k \, \hat{X}_{D_k} \tag{4.7}$$

mit

$\hat{v}_{X_{m_k}}$	:	Verbesserung der äußeren Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
$\hat{X}_{m_k}$	:	Unbekannte äußere Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
X_{m_k}	:	Beobachtete äußere Orientierung des Orientierungspunkts m in Streifen k
$\hat{X}_{B_k}$	:	Unbekannter Bias in Streifen k
$\hat{X}_{D_k}$	:	Unbekannte lineare Drift pro Zeilenbild in Streifen k
m_k	:	Zeilennummer des Orientierungspunkts in Streifen k
j_k	:	Nummer des Zeilebildes in Streifen k

Ebenfalls ist es möglich, das mathematische Modell um zusätzliche Beobachtungsgleichungen zu erweitern. Die Gleichungen (4.8) zeigen die Beobachtungsgleichungen für X_{B_k} und X_{D_k}. Die Gleichungen für $\hat{v}_{Y_{B_k}}, \hat{v}_{Z_{B_k}}, \hat{v}_{Y_{D_k}}, \hat{v}_{Z_{D_k}}$ sind analog zu diesen Gleichungen aufgebaut.

$$\begin{aligned} \hat{v}_{X_{B_k}} &= \hat{X}_{B_k} - X_{B_k} \\ \hat{v}_{X_{D_k}} &= \hat{X}_{D_k} - X_{D_k} \end{aligned} \tag{4.8}$$

mit

$\hat{v}_{X_{B_k}}$	:	Verbesserung des Bias in Streifen k
$\hat{X}_{B_k}$	:	Unbekannter Bias in Streifen k
X_{B_k}	:	Beobachteter Bias in Streifen k
$\hat{v}_{X_{D_k}}$	:	Verbesserung der linearen Drift pro Zeilenbild in Streifen k
$\hat{X}_{D_k}$	:	Unbekannte lineare Drift pro Zeilenbild in Streifen k
X_{D_k}	:	Beobachtete lineare Drift pro Zeilenbild in Streifen k

In das stochastische Modell der Ausgleichung gehen die in Abschnitt 5.1.3 angegebenen Genauigkeiten ein. Damit wird erreicht, dass sich die HRSC Daten bezüglich des MOLA DGMs verschieben und verkippen können.

4.5.1.2 Modellierung mittels Keplerelementen

Bei Untersuchungen in Abschnitt 5.6 wird gezeigt, dass die bei Mars Express auftretenden Änderungen der Bahn durch Ansatz von den Unbekannten, mit Bias und linearer Drift, anstatt der Keplerelemente modelliert werden können. Der verbleibende Modellfehler beträgt nur wenige Meter in allen drei Koordinatenachsen. Aus diesem Grund wird auf eine Modellierung mittels Keplerelementen verzichtet.

4.5.2 Lagewinkel

Wie in Abschnitt 2.3.3.2 gezeigt, bestehen neben kleinen zufälligen Abweichungen der vorhergesagten Lagewinkel von den tatsächlich eingestellten Lagewinkel am Orbiter systematische Fehler zwischen Sternenkamera und HRSC (Alignment). Diese konstanten Winkel können in der Ausgleichung durch einen gemeinsamen Bias modelliert oder mit den Parametern der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten geschätzt werden. Werden diese konstanten Winkel sowohl mit einem Bias als auch an den Orientierungspunkten geschätzt, führt dies zu hohen Korrelationen zwischen den Parametern der Orientierungspunkte und den Biasparametern. Da allerdings aufgrund des Lageverlaufs ohnehin Orientierungspunkte eingeführt werden müssen, werden die Biasparameter der Lage nicht geschätzt. Die absoluten Lagewinkel werden von der Sternenkamera alle 500 ms bestimmt (siehe Abschnitt 2.3.3.2). Dies führt dazu, dass Kreiseldriften praktisch nicht auftreten und somit auch nicht modelliert werden müssen.

4.6 Passinformation aus MOLA-Daten

Am Mars liegen nur wenige Passpunkte vor, die zudem nur begrenzte Genauigkeit besitzen (siehe Abschnitt 3.4). Deshalb ist zusätzliche Passinformation notwendig, um die durch die photogrammetrische Punktbestimmung abgeleiteten Objektpunkte in das vorhandene Referenzsystem am Mars einzupassen und die äußere Orientierung zu verbessern. Aus der MGS Mission liegen hierfür eine Vielzahl von MOLA Messungen in Form eines DGMs (siehe Abschnitt 2.2.3.5) vor, die als Passinformation herangezogen werden können. Das Problem liegt allerdings darin, dass die Laserpunkte nicht auf herkömmliche Art in den Bildern identifiziert werden können, d.h. es können in den Bildern keine Bildkoordinaten der Laserpunkte gemessen werden. Somit können die Laserpunkte nicht als normale Passpunkte in die Bündelausgleichung eingeführt werden.

Ausgehend von dem vorliegenden Ansatz zur Nutzung von nicht in den Bildern identifizierbaren Passpunkten als Passinformation (siehe Abschnitt 3.4.1) wird ein Ansatz entwickelt, mit dem die äußere Orientierung der HRSC an das MOLA Referenzsystem angepasst werden kann. Für diesen Fall muss das Ausgleichungsmodell um zusätzliche Bedingungen erweitert werden, um eine Beziehung zwischen dem MOLA DGM und den HRSC Objektpunkten herzustellen. Die Bedingung besagt, dass die HRSC Objektpunkte auf einer bilinearen MOLA Oberfläche liegen sollen, die durch vier benachbarte MOLA DGM Punkte (M_1, M_2, M_3, M_4), welche den HRSC Objektpunkt umschließen, definiert ist (siehe Abbildung 4.4)

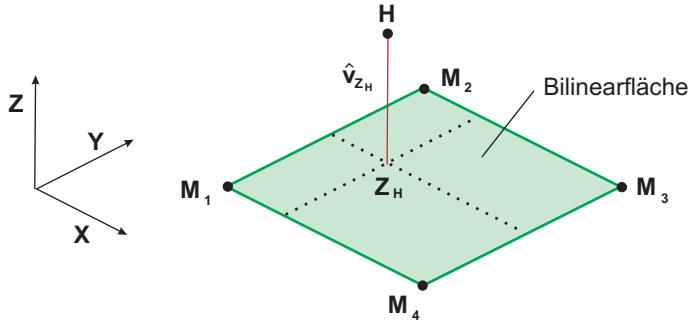


Abbildung 4.4. HRSC Punkt in der durch MOLA aufgespannten Bilinearfläche

Formuliert werden kann dies durch eine zusätzliche Beobachtung Z_H pro Objektpunkt, die durch bilineare Interpolation des MOLA DGMs an der Stelle der Unbekannten $\hat{X}_H, \hat{Y}_H$ gewonnen wird (Gleichung 4.9).

$$\begin{aligned} Z_H &= [(1-\tfrac{\hat{X}_H-X_{M_1}}{d})(1-\tfrac{\hat{Y}_H-Y_{M_1}}{d})\,Z_{M_1} + (\tfrac{\hat{X}_H-X_{M_1}}{d})(1-\tfrac{\hat{Y}_H-Y_{M_1}}{d})\,Z_{M_4} + \\ &+ (1-\tfrac{\hat{X}_H-X_{M_1}}{d})(\tfrac{\hat{Y}_H-Y_{M_1}}{d})\,Z_{M_2} + (\tfrac{\hat{X}_H-X_{M_1}}{d})(\tfrac{\hat{Y}_H-Y_{M_1}}{d})\,Z_{M_3}] \end{aligned} \tag{4.9}$$

mit

Z_H	:	aus MOLA interpolierte Beobachtung
$\hat{X}_H, \hat{Y}_H$	:	Unbekannte Koordinaten des Objektpunkts H
$X_{M_i}, Y_{M_i}, Z_{Z_i}$	:	Konstante Koordinaten der MOLA DGM Machenpunkte
d	:	Maschenweite ($d = X_{M_4} - X_{M_1} = Y_{M_2} - Y_{M_1}$) des MOLA DGM

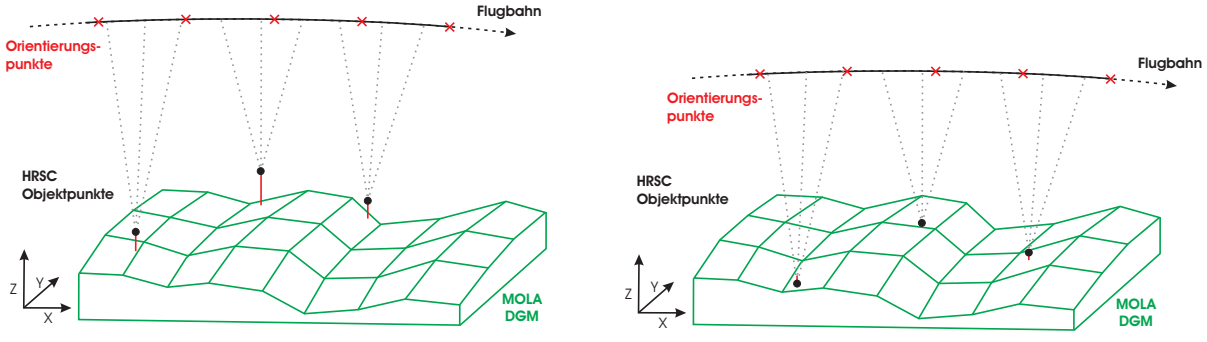
Für die zusätzliche Beobachtung wird das mathematische Modell um eine Beobachtungsgleichung erweitert (Gleichung (4.10)).

$$\hat{v}_{Z_H} = \hat{Z}_H - Z_H \tag{4.10}$$

mit

$\hat{v}_{Z_H}$	:	Verbesserung der Höhe $\hat{Z}_H$
$\hat{Z}_H$	:	Unbekannte Höhe des Objektpunkts H
Z_H	:	aus MOLA interpolierte Beobachtung

Mit diesem Ansatz kann vor allem eine Verbesserung der Höhe (Z) erreicht werden. Eine Verbesserung der horizontalen Position (X, Y) wird ermittelt, wenn das Gelände in unterschiedlichen Richtungen genügend starke Neigungen aufweist. Die Genauigkeit erhöht sich proportional mit steigender Geländeneigung, d.h. bei größeren Geländeneigungen erhöht sich die Genauigkeit in der horizontalen Position (X, Y). Abbildung 4.5(a) zeigt die Situation vor der Ausgleichung. Werden während der Ausgleichung z.B. Verschiebungen sowohl in Z als auch in X und Y angebracht, wird der Abstand zwischen dem Punkt H und der Bilinearfläche minimiert. In Abbildung 4.5(b) ist das endgültige Ergebnis nach der Ausgleichung dargestellt.



(a) vor der Ausgleichung (b) nach der Ausgleichung

Abbildung 4.5. MOLA als Passinformation

Nachteilig bei diesem Ansatz ist, dass nicht die Originallasermessungen, sondern nur die interpolierten DGM Punkte verwendet werden. Der Vorteil bei der Nutzung der DGM Gitterpunkte liegt wegen der regelmäßigen Struktur in einem reduzierten Aufwand bei der Suche nach passenden benachbarten MOLA DGM Punkten und der einfacheren Implementierung in die Bündelausgleichung. Die Standardabweichung einer interpolierten Beobachtung für das stochastische Modell wird durch die Genauigkeit der vier umliegenden MOLA DGM Punkte festgelegt.

4.7 Schätzung der inneren Orientierung

In Kapitel 6 wird gezeigt, inwieweit die Parameter der Hauptpunktsverschiebung x_{0_s} und y_{0_s} der inneren Orientierung simultan zur äußeren Orientierung geschätzt werden können. Ebenfalls ist in Kapitel 6 dargestellt, weshalb c nicht mitgeschätzt werden kann.

Damit die Hauptpunktsverschiebungen x_{0_s} und y_{0_s} nicht als konstante Parameter sondern als Unbekannte Parameter $\hat{x}_{0_s}$ und $\hat{y}_{0_s}$ in die Ausgleichung einfließen können, müssen die bereits in Gleichung (4.1) gezeigten Kollinearitätsgleichungen geändert werden (Gleichung (4.11)).

$$\begin{aligned} x_{ij_ks} + \hat{x}_{0_s} + \hat{v}_{x_{ij_ks}} &= c\,\frac{\hat{r}_{j_k11}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k21}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k31}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})}{\hat{r}_{j_k13}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})} \\ y_{ij_ks} + \hat{y}_{0_s} + \hat{v}_{y_{ij_ks}} &= c\,\frac{\hat{r}_{j_k12}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k22}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k32}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})}{\hat{r}_{j_k13}(\hat{X}_i - \hat{X}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{j_k}) + \hat{r}_{j_k33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_{j_k})} \end{aligned} \tag{4.11}$$

mit

x_{ij_ks}, y_{ij_ks}	:	in Zeilenbild j des Sensors s beobachtete Bildkoordinaten des Objektpunktes P_i in Streifen k
$\hat{v}_{x_{ij_ks}}, \hat{v}_{y_{ij_ks}}$	:	Verbesserungen der Bildkoordinaten
$\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$	:	Koordinaten des Objektpunkts P_i
$\hat{X}_{j_k}, \hat{Y}_{j_k}, \hat{Z}_{j_k}$	:	Koordinaten des Projektionszentrums des Zeilenbildes j in Streifen k
$\hat{r}_{j_k11}, ..., \hat{r}_{j_k33}$	:	Elemente der Rotationsmatrix R_{j_k} (Gleichung (4.2))
$\hat{x}_{0_s}, \hat{y}_{0_s}$	:	Unbekannte Parameter der inneren Orientierung für jeden Sensor s
c	:	Konstanter Parameter der inneren Orientierung

Außerdem muss das mathematische Modell pro Sensor um zusätzliche Beobachtungsgleichungen erweitert werden (Gleichung (4.12)).

$$\begin{aligned} \hat{v}_{x_{0_s}} &= \hat{x}_{0_s} - x_{0_s} \\ \hat{v}_{y_{0_s}} &= \hat{y}_{0_s} - y_{0_s} \end{aligned} \tag{4.12}$$

mit

$\hat{v}_{x_{0_s}}, \hat{v}_{y_{0_s}}$	:	Verbesserungen der Parameter der inneren Orientierung
$\hat{x}_{0_s}, \hat{y}_{0_s}$	:	Unbekannte Parameter der inneren Orientierung
x_{0_s}, y_{0_s}	:	Beobachtungen für die Parameter der inneren Orientierung
s	:	Sensor, z.B. ND, S1, S2, ...

Für die Beobachtungen werden in diesem Fall im stochastischen Modell geringe Genauigkeiten gewählt, damit die Parameter der inneren Orientierung die Wirkung von freien Unbekannten in der Ausgleichung haben.

5. Schätzung der äußeren Orientierung der HRSC auf MEX

In diesem Kapitel werden die Parameter der äußeren Orientierung der HRSC mit dem im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Modell geschätzt. Hierzu wird zunächst auf die Eigenschaften und die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Daten sowie auf etwaige erforderliche Vorverarbeitungsschritte zur Aufbereitung der Daten eingegangen, bevor mit dem entwickelten Auswertekonzept Einzelstreifen ausgeglichen und verschiedene Varianten des Ausgleichungsmodells untersucht werden. Mit der optimalen Modellvariante werden schließlich Massendaten und Blöcke ausgeglichen. In diesem Kapitel wird für die innere Orientierung ein fester Parametersatz verwendet, dessen Schätzung in Kapitel 6 beschrieben wird.

5.1 Eigenschaften und Genauigkeit der Daten

Grundsätzlich wären für die photogrammetrische Punktbestimmung Daten wünschenswert, die in niedriger Flughöhe und mit hoher geometrischer Auflösung in allen 5 panchromatischen Sensoren aufgenommen werden. Außerdem sollten die Bilder gut texturiertes Gelände zeigen. Leider können bei der Mars Express Mission nicht immer alle, aus photogrammetrischer Sicht, wünschenswerten Rahmenbedingungen erfüllt werden. Im Folgenden wird im Einzelnen auf die vorhandenen Daten eingegangen und es werden die Konsequenzen für die Bündelausgleichung dargestellt.

5.1.1 Bilddaten

Innerhalb der ersten drei Jahre der Mars Express Mission wurden 99,4 Mio. km^2 der Marsoberfläche mit 1438 Einzelstreifen aufgenommen (siehe Abbildung 5.1). Bei einer Gesamtoberfläche des Mars von 145 km^2 entspricht dies 68 Prozent. Bilddaten mit einer Bodenauflösung von bis 10 – 20 m bedecken 45,0 Mio. km^2 bzw. 31 Prozent der Marsoberfläche.

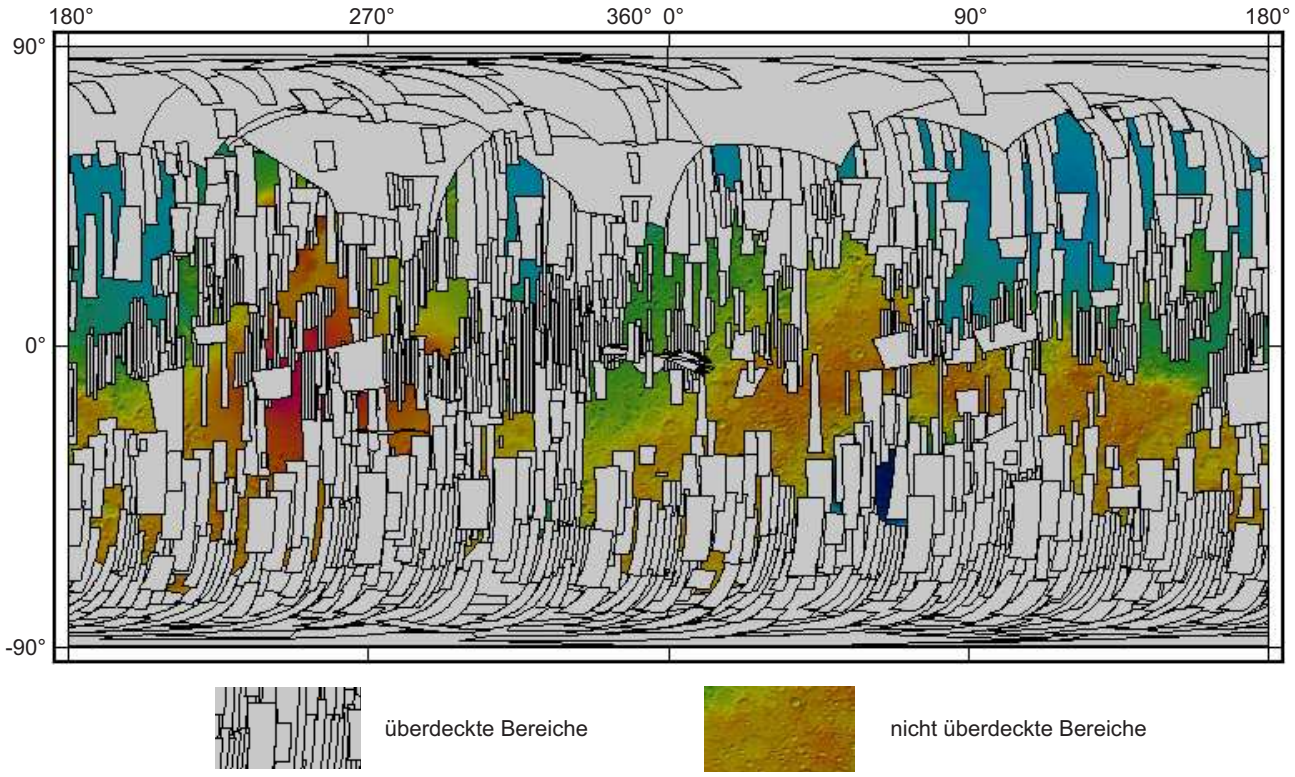


Abbildung 5.1. Aufgenommene Streifen Januar 2004 – Dezember 2006

Von diesen Bilddaten lassen sich grundsätzlich 1200 Streifen photogrammetrisch auswerten und werden deshalb als „mittels photogrammetrischer Punktbestimmung auswertbar“ oder als „eventuell mittels photogrammetrischer Punktbestimmung auswertbar“ klassifiziert. Die restlichen 11 Prozent der Daten weisen Merkmale mindestens einer der folgenden Kategorien auf:

- Mit den genutzten Zuordnungsverfahren (siehe Abschnitt 5.1.2) können in Bildern einiger Gebiete keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden, da die Bilder dieser Gebiete nur **sehr geringe Texturen** aufweisen.

- Im Laufe der Mission wurden einige wenige Streifen aufgenommen, die aufgrund von Übertragungsfehlern sehr **große Lücken** aufweisen. Dieser Umstand behindert sowohl die Bildzuordnung als auch die Bündelausgleichung. Betroffen sind vor allem Bilddaten, die im ersten halben Jahr der Mission aufgenommen wurden.

- In wenigen Fällen wurde die Oberfläche des Mars nur mit dem Nadirkanal aufgenommen, weshalb **keine Stereoinformation** vorhanden und somit auch keine photogrammetrische Punktbestimmung mit dem vorgestellten Verfahren möglich ist.

- **Limbaufnahmen** sind Schrägsichtaufnahmen, die Teile der Atmosphäre und am Rand kleine Gebiete der Marsoberfläche zeigen. Auf eine Auswertung dieser Bilder wird meist verzichtet, da die Bilder häufig nur geringe Texturen aufweisen.

- Um die Kamera auf ihre Funktionstüchtigkeit zu überprüfen, wurden einige **Testbilder** aufgenommen, die für die photogrammetrische Prozessierung nicht relevant sind.

- Einige Bilddaten sind wegen **Fehlern bei der Aufnahme** nicht zu gebrauchen. Dies zeigt sich vor allem durch fehlende Überdeckung der Bilddaten der Stereokanäle oder durch Überbelichtung der Bilder.

Die aufgezählten Fälle zeigen Besonderheiten, die eine erfolgreiche photogrammetrische Auswertung nicht zulassen oder sind Einzelfälle, die nicht weiter von Bedeutung sind. Daher werden die Aufnahmen als „nicht mittels photogrammetrischer Punktbestimmung auswertbar“ klassifiziert. Im Folgenden wird nicht weiter auf diese Aufnahmen eingegangen. Aufnahmen der Marsmonde Phobos und Deimos, die prinzipiell photogrammetrisch auswertbar sind, werden in dieser Arbeit ebenfalls außer Acht gelassen. Zur Auswertung stehen sogenannte Level-2 Daten (radiometrisch korrigierte Bilder) und Level-3 Daten (vorläufige Orthophotos) zu Verfügung. Level-1 Daten (Rohdaten) sind für die photogrammetrische Prozessierung nicht geeignet.

5.1.1.1 Bezeichnung der Bilder und Integrationszeit

Normalerweise wird die Kamera nur einmal pro Orbit betrieben und zwar in dem Bahnabschnitt, in dem die Flughöhe am niedrigsten ist. Wenn die HRSC allerdings außerhalb des Perizentrums ein interessantes Gebiet überfliegt, wird die Kamera dort ebenfalls eingeschaltet. Somit können pro Orbit mehrere unabhängige Bildstreifen entstehen. Alle Bildstreifen eines Orbits werden mit der Orbitnummer (z.B. h0997) und einer Sequenznummer (z.B. 0000 für die erste bzw. 0001 für die zweite Aufnahmesequenz) bezeichnet. Für die zwei Beispiele entstehen somit die Bezeichnungen h0997_{0000} bzw. h0997_0000 und h0997_{0001} bzw. h0997_0001.

Wegen des stark elliptischen Orbits variiert die Flughöhe innerhalb eines Aufnahmezeitraums und damit auch die Bodenpixelgröße quer zur Flugrichtung. Die Bodenpixelgröße entlang der Flugrichtung ist von der Integrationszeit der CCD Sensoren und der Fluggeschwindigkeit des Orbiters abhängig. Da sich die Geschwindigkeit des Orbiters nach physikalischen Gesetzen ändert, muss die Integrationszeit der CCD Sensoren variiert werden, um quadratische Bodenpixel zu generieren (siehe Abschnitt 2.3.2.2).

5.1.1.2 Flughöhe, Streifenbreite und Streifenlänge

Knapp zwei Drittel der ausgewerteten Bilder wurden in einer durchschnittlichen Flughöhe von weniger als 500 km aufgenommen. Dies entspricht einer Pixelauflösung am Boden von weniger als 20 m (siehe Tabelle 5.1). Die Streifenbreite ist proportional zur Flughöhe, d.h. eine größere Flughöhe ergibt eine breitere Abdeckung eines Streifens am Boden mit geringerer Bodenauflösung. Eine niedrige Flughöhe bzw. eine gute Pixelauflösung am Boden ist wichtig, da diese direkt die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflusst.

Flughöhe	Bodenauflösung	Streifenbreite	Anzahl
$<$ 500 km	$<$ 20 m	$<$ 103 km	785 = 65 %
500 – 1000 km	20 – 40 m	103 – 206 km	261 = 22 %
$>$ 1000 km	$>$ 40 m	$>$ 206 km	154 = 13 %

Tabelle 5.1. Durchschnittliche Flughöhen

Die Längen der einzelnen Streifen variieren stark. Es gibt Streifen, die nur knapp 100 km lang sind. Es werden aber auch Streifen mit mehreren tausend Kilometern Länge aufgenommen. Üblicherweise überdecken die Streifen in Flugrichtung Gebiete von 400 km bis 4000 km.

5.1.1.3 Makropixelformat und Komprimierung

Wegen fehlender Bandbreite können nicht alle aufgenommenen Daten vom Mars Express Orbiter zur Erde übertragen werden. Aus diesem Grund werden die Daten einiger Sensoren vor der Datenübertragung zusammengefasst (siehe Abschnitt 2.3.2.2). Um Daten mit MPF 2 zu bilden, wird quer zur Flugrichtung von zwei nebeneinander liegenden Sensorelementen und in Flugrichtung von zwei zeitlich hintereinander aufgenommenen Zeilenbildern der Mittelwert der insgesamt vier Grauwerte gebildet. Für das MPF 4 bzw. MPF 8 wird die Prozedur insgesamt 2 bzw. 3 mal durchgeführt und die Daten von 16 bzw. 64 aufgenommenen Pixeln werden dadurch zusammengefasst. MPF 1 gibt an, dass die Daten in der ursprünglichen Auflösung vorhanden sind. In Tabelle 5.2 werden die bis Dezember 2006 mit der HRSC aufgenommenen Daten entsprechend den MPFen in fünf Klassen unterteilt.

Anzahl	ND	S1/S2	P1/P2	RE/GR/BL/IR
588 = 49 %	1	2	4	4/8
442 = 37 %	1	2	2	4/8
97 = 8 %	1	2	-	2/4/8
34 = 3 %	1	1	2	-
39 = 3 %	unterschiedliche MPFe			

Tabelle 5.2. Verschiedene Makropixelformate

Bei der überwiegenden Anzahl der Streifen (49 % + 37 % + 8 % = 94 %) sind die Bilder des ND Sensors im MPF 1 und die Bilder der S1 und S2 Sensoren im MPF 2 vorhanden. Die Streifen unterscheiden sich vor allem im Vorhandensein bzw. dem MPF der Bilder der P1 und P2 Sensoren. Die Daten der Farbsensoren stehen fast immer zur Verfügung, meist aber mit deutlich geringerer geometrischer Auflösung.

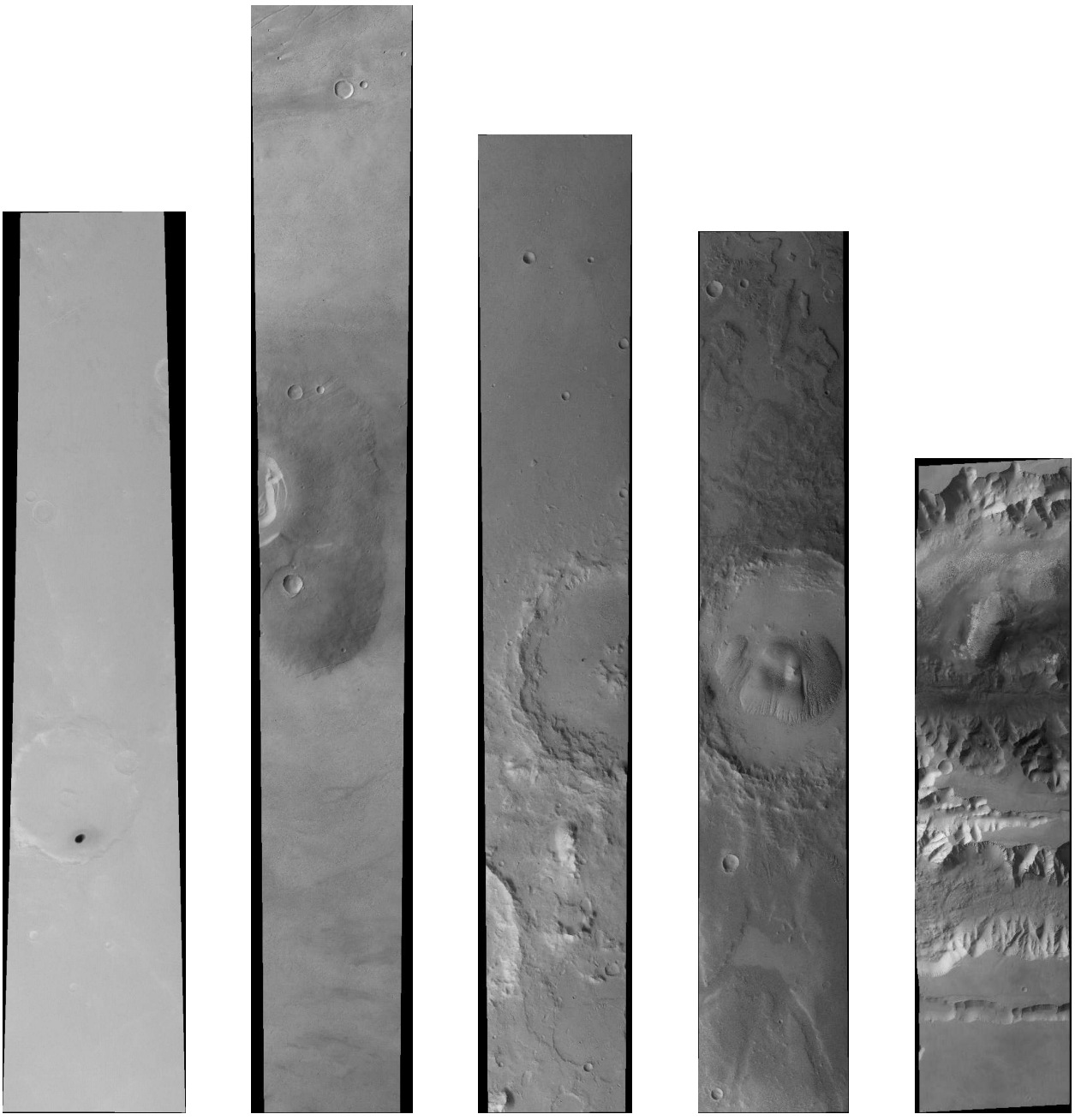
In 3 % der Streifen sind die Daten der vorwärts bzw. rückwärts blickenden Sensoren S1 und S2 in voller Auflösung verfügbar. Dies ist nur dann möglich, wenn die Farbsensoren überhaupt nicht betrieben werden. In weiteren 3 % der Streifen liegen die Daten in 16 unterschiedlichen Kombinationen von MPFen vor.

Zusätzlich zur Makropixelbildung werden die Daten komprimiert, bevor sie zur Erde übertragen werden (Schwarz, 1995). Die Komprimierung arbeitet ähnlich der bekannten JPEG-Komprimierung, d.h. es werden 8 x 8 Pixel große Kacheln gebildet und diese mit einer diskreten Kosinustransformation komprimiert (Ahmed et al., 1974; Chitprasert und Rao, 1990). Die Kachelbildung kann bei bestimmten

Texturen zu unerwünschten Artefakten beim dekomprimierten Bild führen. Im schlimmsten Fall entstehen durch die Artefakte Fehlzuordnungen bei der Bildzuordnung, die wiederum in der Ausgleichung Probleme bereiten können.

5.1.1.4 Bildtexturen und Geländeform

Die Bilddaten der HRSC weisen je nach Streifen unterschiedliche Bildtexturen auf. Fünf Beispiele sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Bilder des Streifens h1323$_{0000}$ sind texturarm (siehe Abbildung 5.2(a)). Etwas mehr Textur zeigt das Bild des Streifen h1019$_{0000}$ (siehe Abbildung 5.2(b)). In Streifen h2063$_{0000}$ (siehe Abbildung 5.2(c)) findet sich im südlichen Teil des Bildes stärkere Textur. Der nördliche Teil des Bildes weist jedoch schwächere Textur auf. Sehr texturreich hingegen sind die Bilder der Streifen h2007$_{0000}$ (siehe Abbildung 5.2(d)) und h0997$_{0001}$ (siehe Abbildung 5.2(e)).



(a) h1323$_{0000}$ (b) h1019$_{0000}$ (c) h2063$_{0000}$ (d) h2007$_{0000}$ (e) h0997$_{0001}$

Abbildung 5.2. Orthophotos verschiedener Streifen

Begründet sind die unterschiedlichen Texturen der Bilder nicht nur durch die verschiedenartige Texturierung der Oberfläche, sondern auch durch Sandstürme, die die Sicht auf die Oberfläche behindern oder durch eine ungünstige Beleuchtung infolge eines niedrigen Sonnenstands. Einen großen Einfluss auf die Texturen in den Bildern hat auch die Geländeneigung bzw. die kleinräumige Variation der Geländeneigung. Meist betragen die durchschnittlichen Neigungen im ebenen Gelände unter 10 %. Weit größere Geländeneigungen treten in Regionen wie dem Valles Marineris (siehe Abbildung 5.2(e)) oder den großen Vulkanen auf.

5.1.1.5 Kleine Datenlücken

Bei der Übermittlung der Daten vom Orbiter zur Erde treten immer wieder Übertragungsfehler auf, die zu kleineren Datenlücken in den Bilddaten führen. Häufig fehlen dadurch nur wenige Bildzeilen in den Bildern. Gelegentlich erstrecken sich die Lücken auf einige hundert Bildzeilen. Ganz selten kommt es vor, dass tausende aufgenommener Zeilenbilder verloren gehen. Diese Probleme treten entweder in mehreren Sensoren gleichzeitig oder nur in den Daten eines einzigen Sensors auf.

5.1.1.6 Blöcke

Der Orbit von Mars Express ist relativ polnah (siehe Abschnitt 2.3.3.1). Aus diesem Grund können Blöcke meist nur aus parallel liegenden Streifen gebildet werden. Nur an den Polen sind Bilder aus sich kreuzenden Orbits vorhanden. Fast die gesamte nördliche Polkappe ist mit Bildern abgedeckt. Diese wurden jedoch aus sehr unterschiedlichen Flughöhen und mit unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen aufgenommen.

5.1.2 Bildkoordinaten

Für die Messung der Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte stehen zwei Bildzuordnungsprogramme zur Verfügung, die speziell für die Auswertung von HRSC Daten entwickelt wurden. Dies ist zum einen das ursprünglich am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München entwickelte HWMatch1 (Brand und Heipke, 1998), welches am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität Hannover erweitert und an die Daten der HRSC angepasst wurde (Schmidt et al., 2005). Zum anderen steht das Programm DLRMatch zur Verfügung, welches am Institut für Planetenforschung des DLR Berlin-Adlershof entwickelt wurde. Im Folgenden wird auf die grundsätzlichen Unterschiede dieser beiden Bildzuordnungsverfahren, ihre Ergebnisse und die mit den Bildzuordnungsprogrammen erreichten Genauigkeiten eingegangen.

5.1.2.1 HWMatch1

HWMatch1 verwendet die im Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Level-2 Bilder als Eingangsdaten. Auf das nach dem Least Squares Matching arbeitende Verfahren wurde näher in Abschnitt 3.1.2 eingegangen. Die Ergebnisse sind in vielen Fällen relativ wenige, zufällig verteilte, aber sehr genau zugeordnete Bildkoordinaten. Neben diesen richtig zugeordneten Punkten finden sich in der gesamten Menge der Bildkoordinaten auch grobe Fehler, d.h. Fehlzuordnungen von Bildpunkten, so dass vor der Ausgleichung eine Grobfehlersuche erforderlich ist. Die groben Fehler treten häufiger bei sogenannten 2-Strahlpunkten als bei 3-Strahlpunkten auf und sind abhängig von der Textur der Bilder. 2- bzw. 3-Strahlpunkte sind Objektpunkte, die aus 2 bzw. 3 Bildkoordinatenpaaren verschiedener Sensoren berechnet werden.

Prinzipiell geht das dem Programm zugrunde liegende Verfahren davon aus, dass die zuzuordnenden Bilddaten in etwa dieselbe geometrische Auflösung haben. Liegen Bilddaten mehrerer Sensoren in unterschiedlichen MPF vor, müssen entweder alle Daten in dieselbe geometrische Auflösung umgerechnet werden, oder es können nur die Bilder mit gleichem MPF verwendet werden. Werden einzelne Bilder in eine niedrigere Auflösung umgerechnet, geht Bildinformation verloren. Dies wirkt sich nachteilig auf das grundsätzlich erzielbare Ergebnis aus. Als Standardabweichung der Bildkoordinaten werden in der Bündelausgleichung 0,4 Pixel eingeführt.

Gut eignet sich das Programm für die Zuordnung der Bildkoordinaten mehrerer nebeneinander liegender Streifen. Genutzt werden die Daten dieses Programms daher bei der Bündelausgleichung von Blöcken (siehe Abschnitt 5.2.2 und 5.4). Der Ansatz hat allerdings Schwierigkeiten, wenn Verknüpfungspunkte zwischen unterschiedlichen Streifen zugeordnet werden sollen, deren Bilddaten aus verschiedenen Flughöhen aufgenommen wurden.

5.1.2.2 DLRMatch

DLRMatch benötigt als Eingangsinformation vorläufige Orthophotos, sogenannte Level-3 Daten. Die Bilddaten werden durch eine Orthoprojektion gewonnen, bei der Verzerrungen und Maßstabsunterschiede von Objekten beseitigt werden. In den entzerrten Bildern werden mit merkmals- und flächenbasierten Verfahren Punkte in einem vorgegebenen Raster zugeordnet. Das Verfahren eignet sich daher besonders zur DGM Ableitung. Durch die freie Wahl der Rasterweite kann die Punktanzahl praktisch beliebig erhöht bzw. vermindert werden, um grob- oder engmaschige DGMs zu erzeugen (Wewel, 1996). Aufgrund der großen Anzahl an Objektpunkten können vor der Ausgleichung alle 2-Strahlpunkte verworfen werden. Deshalb treten weniger grobe Fehler auf und es kann als Bildkoordinatengenauigkeit ebenfalls 0,4 Pixel in die Bündelausgleichung eingeführt werden.

Der Vorteil der Daten dieses Programms liegt eindeutig in der großen Anzahl und der gleichmäßig guten Verteilung der Objektpunkte über einen gesamten Streifen. Dies erleichtert eine Anpassung der Objektpunkte an das MOLA DGM. Ein großer Nachteil des Programms ist es allerdings, dass es nicht dafür ausgelegt ist, Bilddaten nebeneinander liegender Streifen Bildkoordinaten zuzuordnen, d.h. die Bildstreifen können nicht über gemeinsame Bildkoordinaten miteinander verknüpft werden. Dies macht eine Auswertung von Blöcken mit den Bildkoordinaten dieses Programms unmöglich. Die Bildkoordinaten dieses Programms werden aus den oben genannten Gründen nur für die Ausgleichung der Einzelstreifen verwendet (siehe Abschnitt 5.2.1 und 5.3).

5.1.3 Äußere Orientierung

Die Parameter X, Y, Z, φ, ω und κ der äußeren Orientierung liegen pro Streifen für jedes Bild zu jedem aufgenommenen Zeilenbild im jeweiligen MPF als diskrete Werte im globalen Marskoordinatensystem vor (siehe Abschnitt 2.3.3.3). Dies bedeutet, dass im Überdeckungsbereich mehrerer Bilder eines Streifens auch mehrere äußere Orientierungen vorhanden sind. Da sich allerdings die Sensoren alle auf der gleichen Flugbahn befunden haben müssen, werden in der Bündelausgleichung in einem Vorverarbeitungsschritt die äußeren Orientierungen aller Sensoren genutzt, um eine gemeinsame äußere Orientierung zu gewinnen. Abbildung 5.3 zeigt verschiedene Situationen schematisch für die drei Sensoren S1, ND und S2.

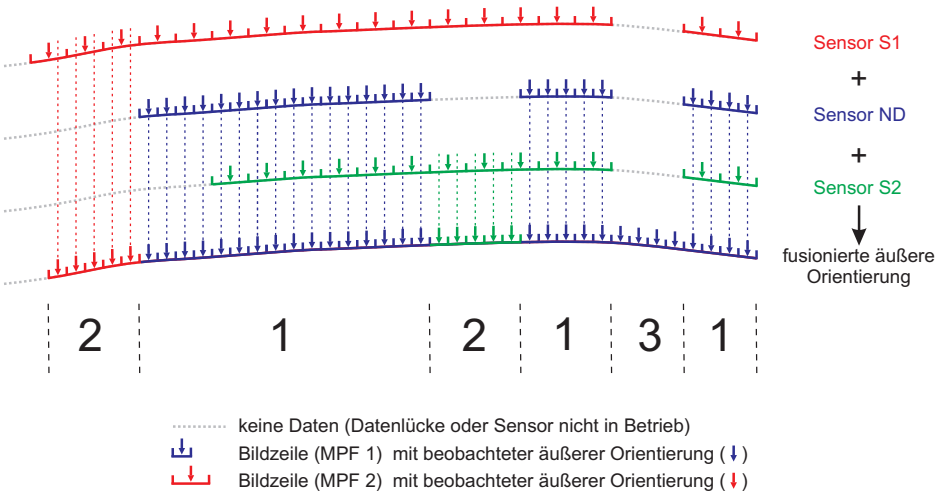


Abbildung 5.3. Fusion der äußeren Orientierung

Normalerweise nimmt nur der ND Sensor im MPF 1 auf. Die Daten der anderen Sensoren liegen im MPF 2 vor. Damit bei der Fusionierung der äußeren Orientierung keine Information verloren geht, wird die äußere Orientierung des ND Sensor direkt in die fusionierte äußere Orientierung übernommen (siehe Abbildung 5.3/Bereich 1). Für die Zeiträume, in der für den ND Sensor keine Daten vorliegen, muss die fusionierte äußere Orientierung aus der äußeren Orientierung der anderen Sensoren interpoliert werden. Die Zeiträume befinden sich in der Regel am Beginn und am Ende eines Streifens oder wenn die Bilddaten bzw. die äußere Orientierung eines Sensors eine Lücke aufweisen (siehe Abbildung 5.3/Bereich 2). Für diese Fälle ist eine lineare Interpolation ausreichend. Fehlen die Bilddaten aus allen Sensoren, so muss die äußere Orientierung für diese Datenlücken aus der umliegenden äußeren Orientierung interpoliert werden (siehe Abbildung 5.3/Bereich 3). Hier genügt ebenfalls eine lineare Interpolation, da gewöhnlich nur wenige Zeilebilder und deren äußere Orientierungen fehlen.

Für die Genauigkeit der Bahn und der Lagewinkel werden in die Bündelausgleichung die in Tabelle 5.3 angegebenen Standardabweichungen in die Ausgleichung eingeführt. Ein Bias-Wert gilt jeweils für einen ganzen Bildstreifen. Für die lineare Drift wird für jedes Zeilenbild eines Streifens die gleiche Standardabweichung eingeführt. An den Orientierungspunkten der Bahn gehen sehr kleine Standardabweichungen in die Ausgleichung ein, da die relative Genauigkeit der Bahn, d.h. von Zeilenbild zu Zeilenbild, praktisch als fehlerfrei betrachtet werden kann. Die Lagewinkel hingegen werden an den Orientierungspunkten mit Standardabweichungen von 28 mgon eingeführt (siehe Abschnitte 4.3 und 4.5).

	X, Y, Z	φ, ω, κ
Bias	1000 m	–
Lineare Drift pro Zeilenbild	0,01 m	–
Orientierungspunkte	–	28 mgon

Tabelle 5.3. Eingeführte Standardabweichungen für die Parameter der äußeren Orientierung

5.1.4 Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung werden aus den Werten der Laborkalibrierung bestimmt (siehe Abschnitte 2.3.2.3 und 4.7). Kapitel 6 beschäftigt sich eingehend mit der Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung für ausgesuchte Streifen simultan mit den Parametern der äußeren Orientierung. Es zeigt sich, dass mit den geschätzten neuen Parametern der inneren Orientierung bessere Ergebnisse bei der Bestimmung der Parameter der äußern Orientierung erzielt werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel der gewonnene Parametersatz der inneren Orientierung aus Kapitel 6 verwendet und als konstant in die Ausgleichung eingeführt.

5.1.5 MOLA Passinformation

Die MOLA Spurpunkte bzw. das daraus abgeleitete MOLA DGM stehen für den ganzen Planeten mit Ausnahme der Polbereiche zur Verfügung (siehe Abschnitt 2.2.3). Verwendet wird als Passinformation das MOLA DGM mit einer Bodenauflösung von 463 m am Äquator. Als Standardabweichung für die zu minimierenden Differenzbeobachtungen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM wird 100 m verwendet. Die Genauigkeitsannahme begründet sich dadurch, dass die Differenzen aufgrund der niedrigen Auflösung des MOLA DGM mehrere 10er Meter betragen können. Außerdem soll die Anpassung an das DGM keinen Einfluss auf die, durch die Bildkoordinaten gebildete, gute Strahlenschnittgeometrie nehmen.

5.1.6 Orientierungspunkte

Voruntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass eine Bestimmung der Parameter der Lagewinkel der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten nur zu gewährleisten ist, wenn der

Abstand zwischen den Orientierungspunkten so groß gewählt wird, dass in den jeweiligen Bildabschnitten mindestens 50 Bildpunkte vorhanden sind. Die Untersuchungen zeigen außerdem, dass die Flugzeit des Orbiters zwischen den Orientierungspunkten 10 Sekunden nicht wesentlich unterschreiten sollte.

Gewöhnlich werden diese Restriktionen erfüllt und die Lagewinkel an vielen Orientierungspunkten geschätzt. Können diese Forderungen z.B. aufgrund von kleineren Lücken in den Bilddaten nicht gewährleistet werden, muss der Abstand zwischen den Orientierungspunkten vergrößert werden. Im Extremfall bedeutet dies, dass in der Ausgleichung nur vier Orientierungspunkte für die Schätzung der äußeren Orientierung verwendet werden.

5.2 Auswertekonzept

Zunächst wird das Auswertekonzept für Einzelstreifen vorgestellt. Um Blöcke ausgleichen zu können, muss dieses Konzept erweitert werden. Anzumerken ist, dass alle im globalen Marskoordinatensystem gegebenen Eingangsdaten vor der Verarbeitung in ein lokales Koordinatensystem transformiert werden, in welchem X in Flugrichtung zeigt und Z die Höhe definiert. Y ergänzt das rechtshändige Koordinatensystem. Werden Blöcke bearbeitet, so definiert X nicht die Flugrichtung aller Einzelstreifen, sondern einen Mittelwert. Nach der Ausgleichung und der Untersuchung der Ergebnisse erfolgt eine Rückrechnung der geschätzten äußeren Orientierung und der HRSC Objektpunkte in das globale Koordinatensystem. Da bei der Anpassung der HRSC Objektpunkte an das MOLA DGM jeder HRSC Objektpunkt innerhalb einer MOLA Bilinearfläche liegen soll, wird die Maschenweite variiert. Die Startmaschenweite wird mit 4000 m angesetzt. Erreicht die Maschenweite nach mehreren Schritten die Größe von 10 m, so wird sie nicht mehr verkleinert.

5.2.1 Einzelstreifen

Die Ausgleichung von Einzelstreifen erfolgt mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Ausgleichungsmodell und wird in mehreren Schritten durchgeführt. Zunächst werden grobe Fehler in den Bildkoordinaten detektiert und in mehreren aufeinander folgenden Ausgleichungen eliminiert. Diesem Schritt folgt die Grobfehlersuche in den Differenzbeobachtungen. Schließlich wird die eigentliche Bündelausgleichung zur Verbesserung der äußeren Orientierung mit dem MOLA DGM gestartet und die Ergebnisse evaluiert. Aus Gründen der Rechenzeit ist in der Bündelausgleichung die Anzahl auf maximal 25000 Objektpunkte begrenzt.

5.2.1.1 Detektion grober Fehler in den Bildkoordinaten

Unter den zugeordneten Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte befinden sich, je nach Qualität der Bilder und der gemessenen äußeren Orientierung, unterschiedlich viele fehlerhafte Bildkoordinaten. Um diese zu detektieren, wird eine Bündelausgleichung angesetzt, in die zunächst das MOLA DGM nicht einfließt, d.h. es wird nur eine relative Orientierung geschätzt. Da hierbei aus geometrischen Gründen fehlerhafte 2-Strahlpunkte nicht erkennbar sind, wenn die x-Bildkoordinate des zugeordneten Punkts Fehler aufweist, werden zunächst ausschließlich 3-Strahlpunkte verwendet.

Nach der ersten Ausgleichung ergeben sich Restfehler in den Bildkoordinaten aus denen ein quadratischer Mittelwert (RMS) berechnet wird. Dieser RMS wird den einzelnen Bildkoordinatenverbesserungen gegenübergestellt. Liegen einzelne Verbesserungen der Bildkoordinaten über dem dreifachen RMS, so wird das Bildkoordinatenpaar als grober Fehler klassifiziert. In die nun folgende zweite Ausgleichung fließen die als grobe Fehler klassifizierten Bildkoordinatenpaare nicht mehr ein. Dieser Prozess wird so lange fortgeführt, bis nur noch maximal 1 % der Bildkoordinatenverbesserungen über dem dreifachen RMS und keine Bildkoordinatenverbesserungen mehr über dem vierfachen RMS liegen. Das Ergebnis besteht aus einer vorläufig verbesserten äußeren Orientierung und einem, aus 3-Strahlpunkten bestehenden Satz von Bildkoordinaten, welcher weitgehend von groben Fehlern befreit ist.

Die Objektpunkte sollten bei der Anpassung an das DGM möglichst gleichmäßig über das gesamte Gebiet verteilt sein. Ist dies nicht allein mit 3-Strahlpunkten möglich, so kann die Objektpunktanzahl

mit 2-Strahlpunkten erhöht werden. Besonders diese Punkte müssen einer Grobfehlersuche unterzogen werden. Allerdings können nur Fehler detektiert werden, wenn sich diese in der y-Komponente der Bildkoordinaten befinden. Eine Detektion von Fehlern in der x-Richtung ist nicht möglich, da sich die Fehler nur in einer Höhenänderung des resultierenden Objektpunkts zeigen. Mit der vorläufig verbesserten äußeren Orientierung, den 3-Strahlpunkten und den bisher nicht verwendeten 2-Strahlpunkten werden Vorwärtsschnitte gebildet. Wie im vorhergehenden Schritt wird wieder der RMS über alle Verbesserungen der Bildkoordinaten berechnet. Verworfen werden die Bildkoordinaten, deren Verbesserung über dem dreifachen RMS liegt. Es entsteht ein erweiterter Satz von Bildkoordinaten, der aus 2- und 3-Strahlpunkten besteht. Auf diesen Schritt kann verzichtet werden, wenn genügend 3-Strahlpunkte vorliegen.

5.2.1.2 Grobe Fehler in den Differenzbeobachtungen

Mit einer Grobfehlersuche in den Differenzbeobachtungen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM werden Fehler aufgedeckt,

- die in den Bildkoordinaten von 2-Strahlpunkten zu finden sind und im vorhergehenden Schritt nicht aufgedeckt werden konnten und
- die eine große Abweichung des jeweiligen HRSC Objektpunkts von dem niedrig aufgelösten MOLA DGM als Ursache haben. Dies ist der Fall, wenn kleinräumige Objekte (z.B. kleine Krater) oder steile Abbruchkanten nur in den HRSC Daten sichtbar sind.

Hierzu wird das Ausgleichungsmodell um zusätzliche Beobachtungsgleichungen zur Nutzung des MOLA DGM ergänzt (siehe Abschnitt 4.6). Auch diese Grobfehlersuche erfolgt wieder in mehreren Schritten und hat Gemeinsamkeiten mit dem Ansatz zur Detektion grober Fehler in den Bildkoordinaten (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Nach Abschluss der ersten Ausgleichung wird der RMS aus den verbleibenden Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM berechnet. Weisen einzelne Objektpunkte größere Restdifferenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM auf, so werden die zugehörigen Bildkoordinaten dann verworfen, wenn die Differenz mehr als den dreifachen RMS beträgt. Anschließend werden so lange weitere Ausgleichungen berechnet, bis keine Differenzen mehr über dem vierfachen RMS liegen und höchstens 1 % der Differenzen den Schwellwert des dreifachen RMS überschreitet. Als Ergebnisse stehen Bildkoordinaten ohne grobe Fehler zur Verfügung.

5.2.1.3 Schätzung der Parameter der äußeren Orientierung

Um die äußere Orientierung zu schätzen wird wieder das, um die zusätzlichen Beobachtungsgleichungen zur Nutzung des MOLA DGM erweiterte, Ausgleichungsmodell, verwendet. Ebenfalls werden als Beobachtungen die Bildkoordinaten ohne grobe Fehler genutzt. Nach der Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung stehen als Ergebnisse die verbesserte äußere Orientierung und die Objektpunktkoordinaten zur Verfügung.

5.2.1.4 Bewertung der Ergebnisse

Die Bewertung der Ergebnisse der Einzelstreifen erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien. Zum einen wird aus den Werten und den Genauigkeiten der Parameter der verbesserten äußeren Orientierung ermittelt, ob sich diese „nicht signifikant“, „schwach signifikant“ oder „signifikant“ schätzen lassen (siehe Tabelle 5.4).

Für die Bewertung werden weiterhin die Genauigkeiten der Objektpunkte, die Verbesserungen der Bildkoordinaten, die Anzahl der Objektpunkte und die Anzahl der Orientierungspunkte herangezogen. Die erreichte absolute Anpassung der HRSC Objektpunkte an das MOLA DGM wird über die verbleibenden Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM und die Verkippung der HRSC Punktwolke in Bezug auf das MOLA DGM nach der Ausgleichung evaluiert. Erstgenannte Differenzen sind für die Höhe Z ein direktes Ergebnis der Ausgleichung und lassen sich relativ einfach

Schätzbarkeit	nicht signifikant	schwach signifikant	signifikant
Wert dividiert durch Standardabweichung des Werts	< 2	$2 - 3$	> 3

Tabelle 5.4. Definition der signifikanten Schätzbarkeit eines Werts

durch einen Differenzplot im Objektraum darstellen, in dem die Z-Differenzen an ihrer X/Y Position farbkodiert dargestellt werden. Für die X- bzw. Y-Differenzen zwischen einem HRSC Punkt und dem MOLA DGM konnte keine vergleichbare, aussagekräftige graphische Form entwickelt werden. Daher sei an dieser Stelle auf die Bewertung der Ergebnisse der Ausgleichung eines Blocks verwiesen (siehe Abschnitt 5.2.2.4).

Als Grundlage für die Berechnung der Verschiebung in Z und der Verkippung der HRSC Punktwolke in Bezug auf das MOLA DGM dienen wiederum die nach der Bündelausgleichung verbliebenen Z-Differenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM. Diese Z-Differenzen werden in einer gesonderten Ausgleichung als Beobachtungen eingeführt, um die unbekannten Parameter einer ausgleichenden Ebene zu bestimmen. Die X und Y Koordinaten der Punkte werden als Konstante eingeführt, so dass als mathematisches Modell eine vermittelnde Ausgleichung genügt.

Bei der Analyse der Parameter, die die Verschiebung und die Steigung der Ebene angeben, sind systematische Fehler in den Z-Differenzen direkt erkennbar. Zusätzlich werden die Steigungsparameter der ausgleichenden Ebene auf die Streifenlänge bzw. -breite umgerechnet. Damit ergibt sich direkt die maximale Auswirkung der Verkippung an den Rändern der Streifen.

5.2.2 Blöcke

Die Detektion grober Fehler in den Bildkoordinaten bei Blöcken ist etwas aufwändiger als bei Einzelstreifen, da sie in mehreren Schritten vonstatten geht. Benötigt werden hierfür Bildkoordinaten, die nebeneinander liegende Streifen verknüpfen. Im ersten Schritt erfolgt die Ausgleichung analog für Einzelstreifen. Hierzu müssen die zugeordneten Bildkoordinaten getrennt nach Streifen einer Grobfehlersuche für Einzelstreifen unterzogen und unabhängig voneinander an das DGM angepasst werden (siehe Abschnitt 5.2.1). Die resultierenden Bildkoordinaten beinhalten mit diesem Verfahren nur Punkte, die in jedem Streifen mindestens 2-Strahlpunkte sind. Im Überlappungsbereich zweier Streifen ergibt dies Verknüpfungspunkte zwischen den Streifen, die aus mindestens 4-Strahlpunkten bestehen.

5.2.2.1 Detektion grober Fehler in den Bildkoordinaten

In diesem Schritt werden die Verknüpfungspunkte zwischen den Streifen, d.h. in den Überlappungsbereichen der Streifen, auf grobe Fehler hin untersucht. Bis auf einen Streifen werden alle Streifen mit Bias und Drift in allen schätzbaren Parametern (wie für die Anpassung ans DGM) einer Bündelausgleichung unterzogen. Das „Festhalten“ eines Streifens ist wichtig, um einem Datumsdefekt vorzubeugen, da dieses Verfahren nur eine relative Orientierung der Streifen zueinander und keine absolute Anpassung an das MOLA DGM vornimmt. Auch hier werden wieder Bildkoordinaten in mehreren Schritten verworfen, deren Verbesserungen mehr als 3 RMS betragen. Die Detektion grober Fehler wird beendet, wenn keine Bildkoordinate über dem vierfachen RMS liegt und höchstens 1 % der Bildkoordinaten den dreifachen RMS überschreitet.

5.2.2.2 Grobe Fehler in den Differenzbeobachtungen

Alle verbleibenden HRSC Objektpunkte werden schließlich analog zu den Verfahren für Einzelstreifen ausgeglichen und der zweiten Grobfehlersuche unterzogen (siehe Abschnitt 5.2.1.2). Ebenfalls werden hier die HRSC Objektpunkte in mehreren Schritten entfernt, wenn die Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM nach der Ausgleichung mehr als 3 RMS betragen. Ein Abbruch

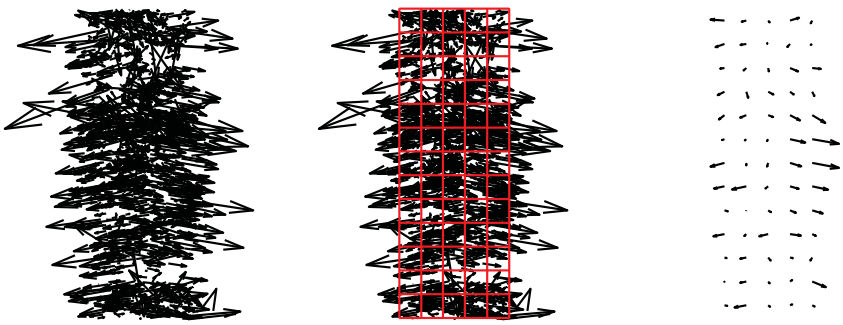
erfolgt wieder, wenn keine der Differenzen über dem vierfachen RMS liegt und höchstens 1 % der Differenzen den Schwellwert des dreifachen RMS überschreitet. Als Ergebnisse stehen Bildkoordinaten ohne grobe Fehler zur Verfügung. Der Unterschied zu der Ausgleichung für Einzelstreifen besteht darin, dass eine Stabilität zwischen den Streifen über die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte gegeben ist.

5.2.2.3 Schätzung der Parameter der äußeren Orientierung

Zur Schätzung der äußeren Orientierung aller zur Blockbildung beitragenden Streifen wird wieder das, um die zusätzlichen Beobachtungsgleichungen zur Nutzung des MOLA DGM erweiterte, Ausgleichungsmodell verwendet. An Bildkoordinaten gehen die um die groben Fehler bereinigten Bildkoordinaten in die Ausgleichung ein. Nach der Ausgleichung stehen die verbesserten äußeren Orientierungen für alle Streifen und die Objektpunktkoordinaten zur Verfügung.

5.2.2.4 Bewertung der Ergebnisse

Die Bewertung wird analog zu dem in Abschnitt 5.2.1.4 vorgestellten Verfahren vorgenommen. Zusätzlich können die Differenzen der X/Y- bzw. Z-Komponenten zwischen den Streifen untersucht werden. Hierfür werden für jeden Streifen die Objektpunktkoordinaten aus den Bildkoordinaten wieder durch Vorwärtsschnitte unabhängig voneinander bestimmt. Im Überlappungsbereich der einzelnen Streifen finden sich Objektpunkte, die das gleiche Merkmal auf der Oberfläche darstellen, aber aus zwei nebeneinander liegenden Streifen berechnet werden. Aus diesen Objektpunktkoordinaten werden die Differenzen gebildet und dargestellt. Da gewöhnlich sehr viele HRSC Objektpunkte in den Überlappungsbereichen vorhanden sind (siehe Abbildung 5.4(a)), wird der Streifen in Kacheln unterteilt (siehe Abbildung 5.4(b)) und für jede Kachel nur ein, aus den einzelnen Vektoren berechneter Mittelwert, gezeigt (siehe Abbildung 5.4(c)). Der Vorteil bei der Mittelwertbildung liegt in der besseren Darstellbarkeit eventuell vorhandener systematischer Effekte.



(a) Alle Objektpunkte (b) Kachelbildung (c) Mittelwerte jeder Kachel

Abbildung 5.4. Darstellung der X/Y Differenzen (Teil eines Streifens)

5.3 Ergebnisse der Bündelausgleichung der Einzelstreifen

Die Ergebnisse der Schätzung der äußeren Orientierung mittels Bündelausgleichung werden in diesem Abschnitt anhand von 12 Streifen eingehend untersucht (siehe Abbildung 5.5 und Tabelle 5.5). Der Streifen h2063$_{0000}$ dient außerdem zur detaillierten Untersuchung verschiedener Varianten des Ausgleichungsmodells.
Bei der Wahl der Streifen wurde Wert darauf gelegt, dass möglichst viele Streifen mit unterschiedlichen Charakteristika betrachtet werden. Aus diesem Grund zeigen die Bilder unterschiedliche Geländetypen und wurden mit verschiedenen Aufnahmekonfigurationen in unterschiedlichen Flughöhen über Grund aufgenommen. Ebenfalls variiert die Länge der Streifen (siehe Abbildung 5.5). Streifen, in denen das Bildzuordnungsprogramm nur eine geringe Anzahl Punkte zugeordnet hat, werden nicht verwendet. Die Anzahl der Objektpunkte liegt zwischen 9600 und 25000 Punkten.

Streifen	mittlere Flughöhe über Grund [km]	Streifen-länge [km]	Anzahl Sensoren	Bildzuodnung in MPF
h0997$_{0001}$	274	485	3	1
h1011$_{0000}$	328	917	5	2
h1019$_{0000}$	293	813	5	2
h1022$_{0000}$	292	954	5	2
h1354$_{0000}$	358	952	9	2/4
h1929$_{0000}$	528	1811	3	1
h1933$_{0001}$	345	1021	5	2
h1943$_{0000}$	407	1663	3	2
h2007$_{0000}$	304	649	3	1
h2025$_{0000}$	323	1223	3	1
h2063$_{0000}$	312	719	9	2/4
h2074$_{0000}$	320	724	5	2

Tabelle 5.5. Eigenschaften der 12 Streifen

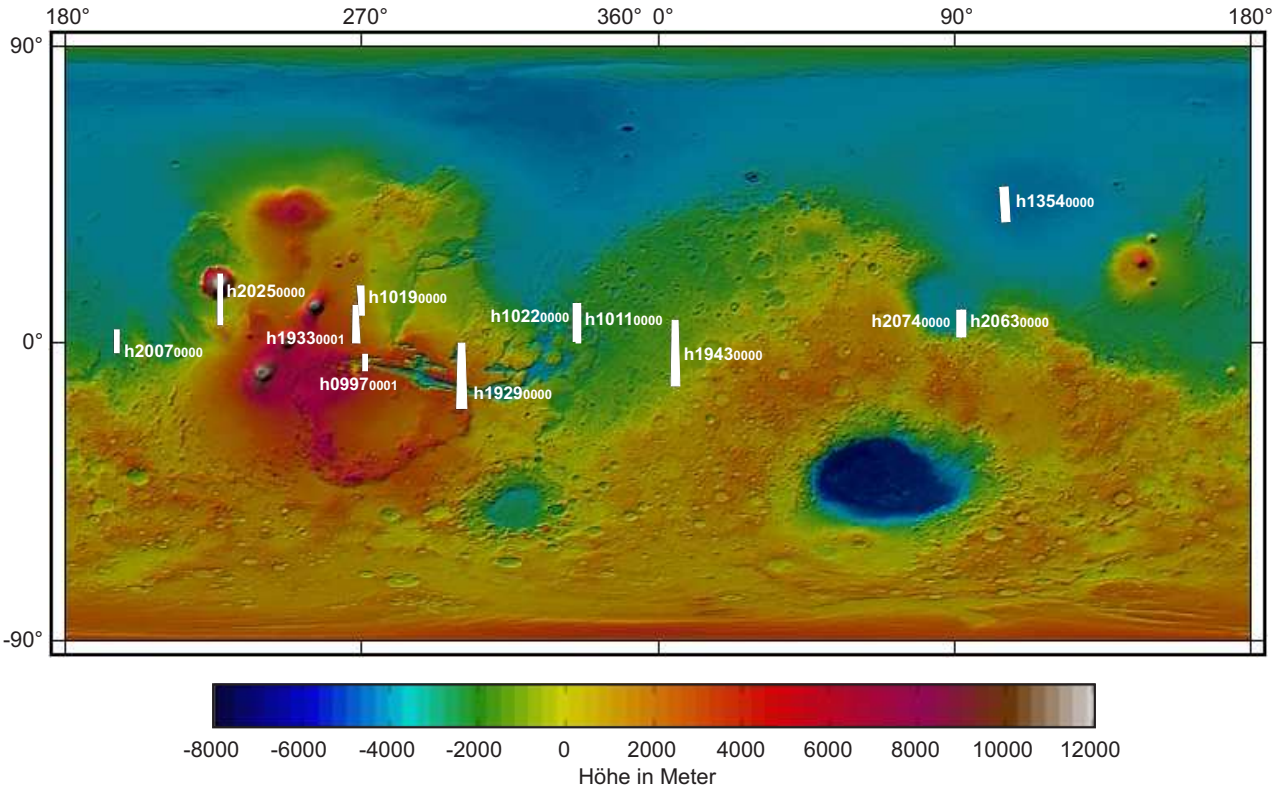


Abbildung 5.5. Lage der 12 Streifen

5.3.1 Grobfehlersuche

Die Grobfehlersuche liefert bei allen untersuchten Streifen gute Ergebnisse. Tabelle 5.6 zeigt die Anzahl Objektpunkte vor der Grobfehlersuche sowie die durch die Detektion grober Fehler in den Bildkoordinaten (Schritt 1) und durch die Grobfehlersuche in den Differenzbeobachtungen (Schritt 2) aufgedeckten groben Fehler. Die Anzahl der Objektpunkte vor der Grobfehlersuche hängt in erster Linie von der Ausdehnung des Gebiets und der Textur der Bilder ab.

Grundsätzlich liegen in Gebieten mit lokal großen Höhenunterschieden im Gelände mehr grobe Fehler vor. Ein Beispiel für stark bewegtes Gelände stellt Streifen h0997$_{0001}$ dar, in welchem durch die Grobfehlersuche 23,6 % an groben Fehlern detektiert werden. Im Allgemeinen beträgt die Menge der Objektpunkte, deren Bildkoordinaten oder deren Differenzbeobachtungen grobe Fehler aufweisen, weniger als 20 %. Damit liegt die Anzahl der Objektpunkte ohne grobe Fehler zwischen knapp 8500

Streifen	Anzahl Objektpunkte mit groben Fehlern	Grobe Fehler detektiert mit Schritt 1	detektiert mit Schritt 2	Gesamt
h0997$_{0001}$	24989	14,1 %	9,5 %	23,6 %
h1011$_{0000}$	25000	5,0 %	7,1 %	12,1 %
h1019$_{0000}$	12663	11,7 %	8,0 %	19,7 %
h1022$_{0000}$	25000	5,8 %	7,6 %	13,4 %
h1354$_{0000}$	20026	2,2 %	3,1 %	5,3 %
h1929$_{0000}$	24996	5,5 %	5,4 %	10,9 %
h1933$_{0001}$	9600	9,3 %	2,9 %	12,3 %
h1943$_{0000}$	24998	7,7 %	5,0 %	12,7 %
h2007$_{0000}$	25000	7,7 %	4,9 %	12,6 %
h2025$_{0000}$	24999	6,0 %	6,5 %	12,6 %
h2063$_{0000}$	24540	1,6 %	3,7 %	5,3 %
h2074$_{0000}$	24267	5,1 %	5,5 %	10,6 %

Tabelle 5.6. Ergebnisse der Grobfehlersuche

und etwas mehr als 23000. Die Anzahl der Objektpunkte nach der Grobfehlersuche kann leicht variieren, wenn zur Grobfehlersuche andere Varianten des Ausgleichungsmodells verwendet werden (siehe Abschnitt 5.3.2).

5.3.2 Untersuchung verschiedener Varianten des Ausgleichungsmodells

Anhand des Streifens h2063$_{0000}$ werden die Ergebnisse verschiedener Varianten des Ausgleichungsmodells jeweils separat untersucht und diskutiert. Dieser Streifen ist für die Untersuchungen gut geeignet, da das Gelände sowohl ebene als auch zerklüftete Gebiete und einen Teil eines größeren Kraters aufweist. Abbildung 5.6 zeigt die verwendeten Objektpunkte und das daraus generierte DGM. In den texturarmen Gebieten im nördlichen Teil des Streifens sind weniger Punkte als im südlichen Teil, dennoch ist die Objektpunktverteilung über den ganzen Streifen hinweg gut bis sehr gut. Das DGM ist aus den verwendeten Punkten generiert und hat damit nur eine geringe Auflösung. Da an dieser Stelle nur die grundsätzliche Struktur des Geländes gezeigt werden soll, ist dies ausreichend.

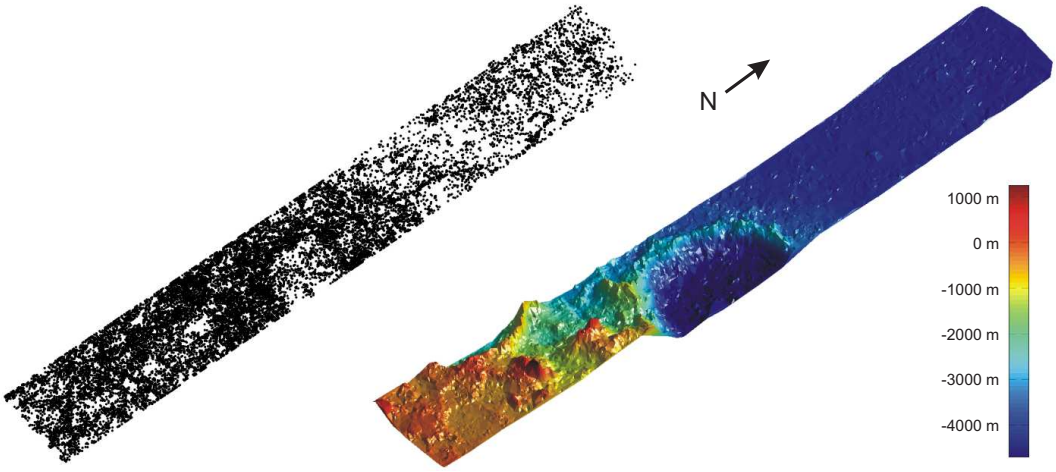


Abbildung 5.6. Streifen h2063_0000: Objektpunktverteilung und DGM (7-fach überhöht)

Im Folgenden werden verschiedene Modellvarianten untersucht und die Ergebnisse dargestellt. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Modellvariante zu generieren, die mit weniger zu schätzenden Parametern auskommt und deshalb einfacher ist. Wichtig ist hierbei, dass sich die Ergebnisse nicht verschlechtern. Nach der Darstellung aller Modellvarianten wird aus den unterschiedlichen Modellvarianten in einer Diskussion die am besten geeignete Variante für die Verbesserung der Parameter der äußeren Orientierung festgelegt.

5.3.2.1 Ursprüngliche Modellvariante

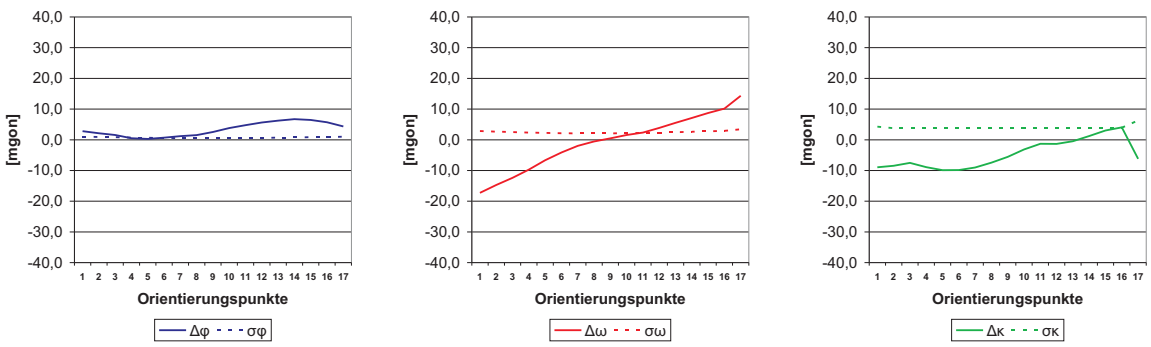
In Kapitel 4 wird das Modell der Ausgleichung detailliert erklärt und über mehrere Schritte zu seiner endgültigen Form entwickelt. Diese sieht vor, die Bias Parameter X_B, Y_B, Z_B, die Drift Parameter X_D, Y_D, Z_D und die Drehwinkel φ_m, ω_m, κ_m an den Orientierungspunkten als unbekannte äußere Orientierung in der Bündelausgleichung anzusetzen. Weitere Unbekannte sind die Objektpunktkoordinaten X, Y und Z. Als Beobachtungen gehen in das Modell die Bildkoordinaten und die Höhendifferenz zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM ein. Für die Bewertung der Ergebnisse werden die Genauigkeiten der Unbekannten und beobachteten Unbekannten, die Verbesserungen der Beobachtungen und die verbleibenden Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM verwendet (siehe Abschnitt 5.2.1.4).

Tabelle 5.7 zeigt die Ergebnisse des Streifens h2063$_{0000}$ unter Verwendung des in Kapitel 4 beschriebenen Ausgleichungmodells in seiner unveränderten Form. Die theoretische Standardabweichung des Bias (σ_{X_B}, σ_{Y_B}, σ_{Z_B}) liegt im Bereich von 20 – 30 m. Während sich die Parameter X_B und Y_B signifikant bestimmen lassen, ist Z_B nicht signifikant schätzbar. Die Werte und Standardabweichungen der Driftparameter sind für den ganzen Streifen angegeben. Die Driftparameter Y_D und Z_D lassen sich signifikant bestimmen. Der Driftparameter X_D, der in erster Näherung einen Maßstabsfaktor hervorruft, kann zum einen nicht signifikant geschätzt werden und hat zum anderen mit einem Wert von 103 m großen Einfluss auf das Ausgleichungssystem.

	X	σ_X	Y	σ_Y	Z	σ_Z
Bias äußere Orientierung:	-129 m	**26,7 m**	137 m	**22,0 m**	-2 m	**27,0 m**
Drift äußere Orientierung:	103 m	**66,2 m**	-352 m	**47,0 m**	-38 m	**10,4 m**
RMS der Objektpunkte:		**13,1 m**		**10,2 m**		**11,9 m**
Verbesserungen der Bildkoordinaten (RMS):						**4,6 μm**
Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM (RMS):						**32,1 m**
Verschiebung Z der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						**0,0 m**
Verkippung der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						ΔZ_X = **0,1 m**
						ΔZ_Y = **0,2 m**

Tabelle 5.7. Ergebnisse Streifen h2063_0000 mit ursprünglicher Modellvariante

Abbildung 5.7 zeigt die Verbesserungen der Lagewinkel φ_m, ω_m und κ_m an den 17 Orientierungspunkten sowie deren theoretische Standardabweichungen. Die durchschnittlichen theoretischen Standardabweichungen der Lagewinkel betragen für die dargestellten 17 Orientierungspunkte φ = 0,7 mgon, ω = 2,5 mgon und κ = 4,0 mgon. Die Wirkung von φ im Objektraum beträgt 3,4 m in X, ω wirkt sich besonders in Y mit 12,3 m und κ vor allem wieder in X, aber nur mit 2,0 m, aus. Die 17 Orientierungspunkte sind gleichmäßig entlang des ganzen Streifens verteilt. Die Flugzeit zwischen den Orientierungspunkten beträgt jeweils ca. 10 Sekunden.



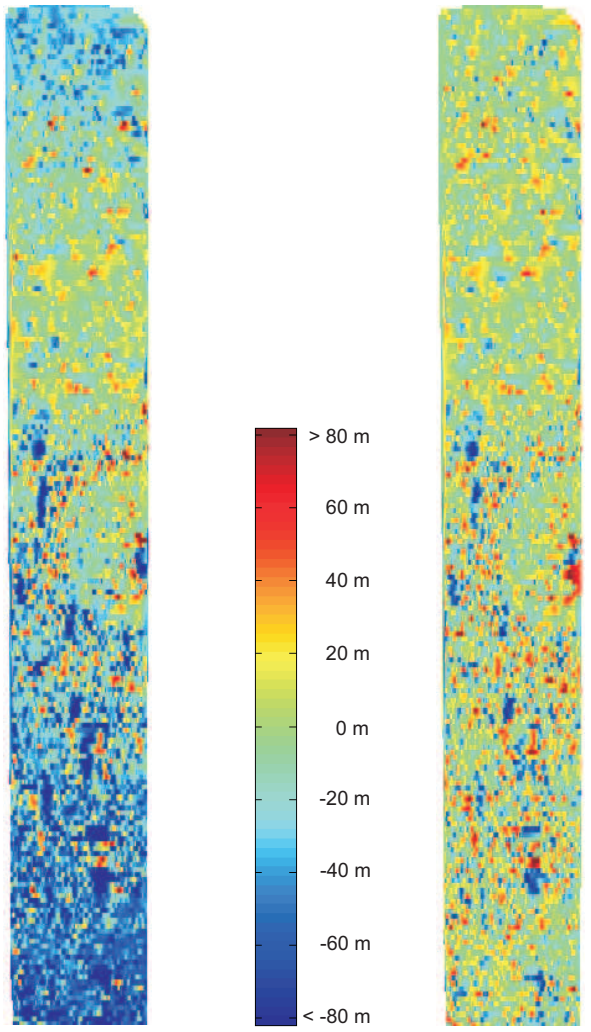
(a) φ (b) ω (c) κ

Abbildung 5.7. Verbesserungen der Lagewinkel an den Orientierungspunkten in Streifen h2063_0000 mit urspr. Modellvariante

Die in Tabelle 5.7 angegebenen theoretischen Standardabweichungen für die Objektpunktkoordinaten sind relativ hoch. Geometrische Überlegungen ergeben, dass hohe Korrelationen zwischen Parametern innerhalb einer der drei Gruppen bestehen:

- X_B und X_D
- Y_B, Y_D und ω
- Z_B und Z_D

Der RMS aller Verbesserungen der Bildkoordinaten liegt bei 4,6 μm. Nach der Grobfehlersuche verbleiben 14826 Punkte, die für die Schätzung der äußeren Orientierung verwendet werden können. Der RMS der Höhendifferenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM sinkt von 48,1 m ohne Ausgleichung auf 32,1 m nach der Ausgleichung. Eine Verkippung der HRSC Punktwolke in Bezug auf das MOLA DGM ist nach der Ausgleichung nicht mehr erkennbar. Die Abbildungen 5.8(a) und 5.8(b) verdeutlichen diese Verbesserung nochmals, denn die systematischen Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM verschwinden nach der Ausgleichung vollständig. Dies zeigt, dass eine wesentliche Verbesserung der Anpassung der HRSC Objektpunkte an das MOLA DGM erreicht wird.



(a) ΔZ vor Ausgl. (b) ΔZ nach Ausgl.

Abbildung 5.8. Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM in der Höhe Z vor bzw. nach der Ausgleichung

5.3.2.2 Modellvariante 1

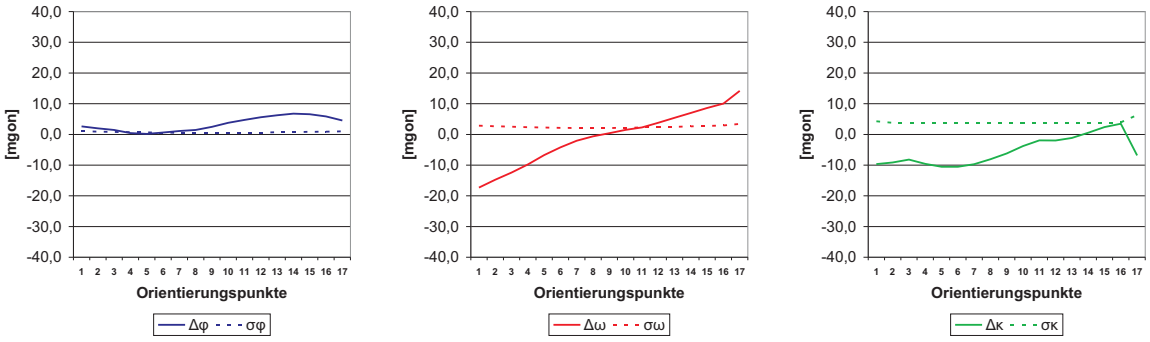
Aus dem vorherigen Abschnitt ist unter anderem ersichtlich, dass der Parameter X_D nicht signifikant geschätzt werden kann. Daher wird das Modell derart modifiziert, dass dieser Parameter nicht mehr geschätzt wird.

Die neuen Ergebnisse sind in Tabelle 5.8 dargestellt. Im Vergleich zu den in Tabelle 5.7 angegebenen theoretischen Standardabweichungen verbessert sich die theoretischen Standardabweichung σ_{X_B} um den Faktor 3,4 und σ_{Z_B} um den Faktor 5, da der Parameter X_D keine Korrelation mehr hervorrufen kann. Die theoretischen Standardabweichungen σ_{Y_B}, σ_{Y_D} und σ_{Z_D} bleiben nahezu unverändert.

	X	σ_X	Y	σ_Y	Z	σ_Z
Bias äußere Orientierung:	-91 m	**7,9 m**	137 m	**22,0 m**	39 m	**5,1 m**
Drift äußere Orientierung:	-	**-**	-345 m	**47,0 m**	-31 m	**9,4 m**
RMS der Objektpunkte:		**7,8 m**		**10,0 m**		**11,9 m**
Verbesserungen der Bildkoordinaten (RMS):						**4,6 μm**
Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM (RMS):						**32,1 m**
Verschiebung Z der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						**0,0 m**
Verkippung der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						ΔZ_X = **0,1 m**
						ΔZ_Y = **0,2 m**

Tabelle 5.8. Ergebnisse Streifen h2063_0000 mit Modellvariante 1

Abbildung 5.9 zeigt die Verbesserungen der Lagewinkel φ_m, ω_m und κ_m an den 17 Orientierungspunkten sowie deren theoretische Standardabweichungen. Die theoretischen Standardabweichungen und die Werte der Lagewinkel ändern sich ebenfalls nicht. Somit betragen die durchschnittlichen theoretischen Standardabweichungen weiterhin für σ_φ = 0,7 mgon, für σ_ω = 2,5 mgon und für σ_κ = 4,0 mgon.



(a) φ (b) ω (c) κ

Abbildung 5.9. Verbesserungen der Lagewinkel an den Orientierungspunkten in Streifen h2063_0000 mit Modellvariante 1

Der quadratische Mittelwert der theoretischen Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten σ_X verbessert sich mit einem Faktor von knapp 2 merklich. Auf die beiden anderen theoretischen Standardabweichungen σ_Y und σ_Z der Objektpunktkoordinaten wirken sich diese Änderungen nur geringfügig aus.

Bei Betrachtung der Verkippung der ausgleichenden Ebene und der Höhendifferenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM sind keine Änderungen zur ursprünglichen Modellvariante erkennbar. Es sind weiterhin, wie in Abbildung 5.8(b) dargestellt, keine systematischen Abweichungen zwischen HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM sichtbar. Der RMS der Höhendifferenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM bleibt im Vergleich zum ursprünglichen Modell unverändert bei 32,1 m. Wegen des anderen Ausgleichungsmodells, welches auch bei der Grobfehlersuche greift, ändert sich die Anzahl der HRSC Objektpunkte geringfügig. Weiterhin bleiben die Korrelationen zwischen Y_B, Y_D und ω_m bestehen. Von diesen drei unbekannten Parametern lässt sich die Drift Y_D am schlechtesten bestimmen.

5.3.2.3 Modellvariante 2

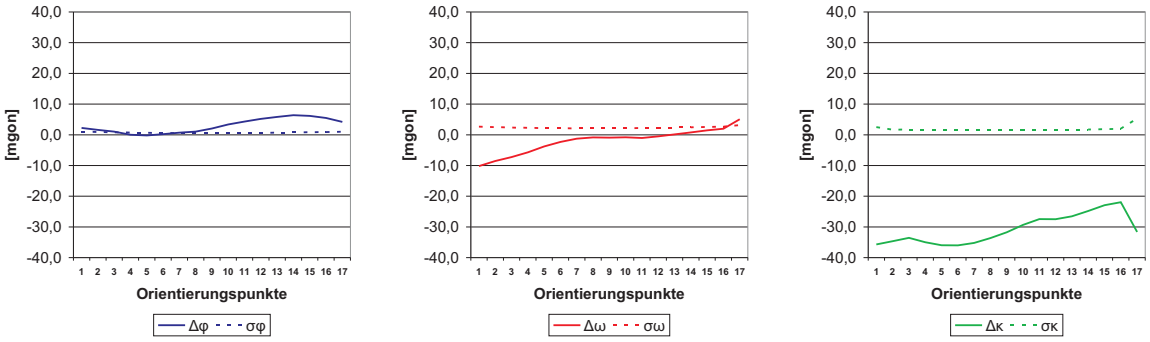
In diesem Abschnitt wird das Modell nochmals variiert, so dass auch der Parameter Y_D nicht mehr geschätzt wird. Tabelle 5.9 zeigt die Ergebnisse. Im Vergleich zu Tabelle 5.8 ist die theoretische Standardabweichung σ_{Y_B} viel besser schätzbar, obwohl der Parameter nicht mehr signifikant geschätzt werden kann, da sich der Wert ebenfalls deutlich geändert hat. Der RMS der theoretischen Standardabweichung der Objektpunktkoordinaten σ_Y kann um 20 Prozent verbessert werden. Die theoretischen Standardabweichungen der anderen Parameter der äußeren Orientierung und der Objektpunktkoordinaten bleiben unverändert.

	X	σ_X	Y	σ_Y	Z	σ_Z
Bias äußere Orientierung:	-93 m	**7,9 m**	5 m	**12,7 m**	39 m	**5,1 m**
Drift äußere Orientierung:	-	**-**	-	**-**	-31 m	**9,4 m**
RMS der Objektpunkte:		**7,8 m**		**8,0 m**		**11,9 m**
Verbesserungen der Bildkoordinaten (RMS):						**4,6 μm**
Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM (RMS):						**32,2 m**
Verschiebung Z der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						**0,0 m**
Verkippung der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						ΔZ_X = **0,1 m**
						ΔZ_Y = **-0,1 m**

Tabelle 5.9. Ergebnisse Streifen h2063_0000 mit Modellvariante 2

Die Verbesserungen ω_m und κ_m an den 17 Orientierungspunkten ändern sich bei der Nutzung dieser Variante. Deutlich ist diese Änderung beim Vergleich der in den Abbildungen 5.9(c) und 5.10(c) dargestellten Werte κ_m zu erkennen, da sich die Werte um einen konstanten Offset unterscheiden. Dies bedeutet, dass der jetzt nicht mehr geschätzte Driftparameter Y_D vor allem durch die Parameter κ_m an den Orientierungspunkten und den Parameter Y_B aufgefangen wird.

Die durchschnittlichen theoretischen Standardabweichungen der Orientierungspunkte liegen nahezu unverändert bei σ_φ = 0,7 mgon und σ_ω = 2,4 mgon. Nur die durchschnittliche theoretische Standardabweichung σ_κ verbessert sich um den Faktor 2 und liegt bei 2,0 mgon (siehe Abbildungen 5.9 und 5.10).



(a) φ (b) ω (c) κ

Abbildung 5.10. Verbesserungen der Lagewinkel an den Orientierungspunkten in Streifen h2063_0000 mit Modellvariante 2

Bei den Differenzen in der Höhe zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM sind ebenfalls keine Änderungen sichtbar. Abbildung 5.8(b) bleibt weiterhin gültig. Die Verkippung der ausgleichenden Ebene gegenüber dem MOLA DGM und der RMS der Höhendifferenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM sind nahezu unverändert. Unverändert bleibt auch der RMS der Bildkoodinatenverbesserungen. Die Anzahl der HRSC Objektpunkte ändert sich kaum. Korrelationen bestehen immer noch zwischen den Parametern Z_B und Z_D.

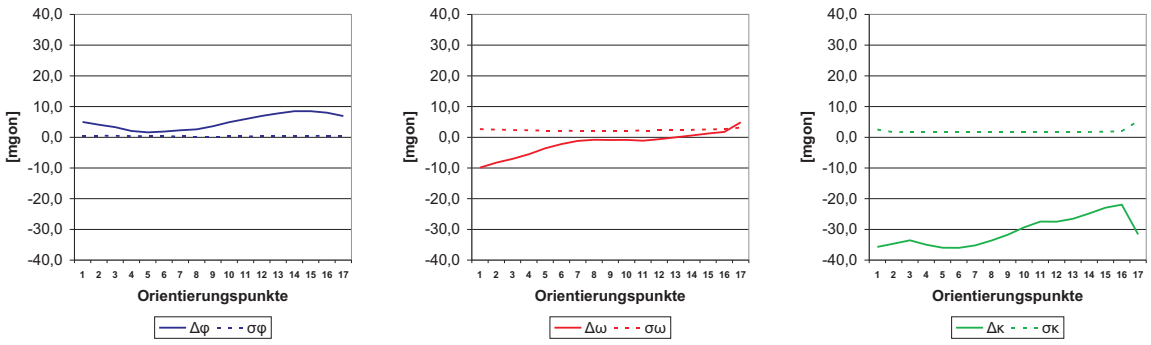
5.3.2.4 Modellvariante 3

Damit zwischen Z_B und Z_D keine Korrelation mehr auftritt, wird das Modell wieder variiert, so dass auch die Drift Z_D nicht mehr geschätzt wird. Die Ergebnisse in Tabelle 5.10 zeigen, dass sich die theoretische Standardabweichung σ_{Z_B} um einen Faktor von knapp 2 verbessert.

	X	σ_X	Y	σ_Y	Z	σ_Z
Bias äußere Orientierung:	-82 m	**7,2 m**	4 m	**12,7 m**	25 m	**2,8 m**
Drift äußere Orientierung:	-	-	-	-	-	-
RMS der Objektpunkte:		**7,7 m**		**8,0 m**		**11,9 m**
Verbesserungen der Bildkoordinaten (RMS):						**4,6 μm**
Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM (RMS):						**32,1 m**
Verschiebung Z der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						**0,0 m**
Verkippung der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM:						ΔZ_X = **-2,8 m**
						ΔZ_Y = **-0,1 m**

Tabelle 5.10. Ergebnisse Streifen h2063_0000 mit Modellvariante 3

Abbildung 5.11 zeigt die Verbesserungen der Lagewinkel φ_m, ω_m und κ_m an den 17 Orientierungspunkten sowie deren theoretische Standardabweichungen. Die theoretischen Standardabweichungen σ_{φ_m} verbessern sich um den Faktor 2 und liegen nun bei durchschnittlich σ_φ = 0,4 mgon. An den Genauigkeiten σ_{ω_m} und σ_{κ_m} ändert sich nichts. Somit bleiben die durchschnittlichen theoretischen Standardabweichungen unverändert bei σ_ω = 2,4 mgon und σ_κ = 2,0 mgon. φ hat bei einer Flughöhe von 312 km am Boden eine Wirkung von 2,0 m in X, ω wirkt sich besonders in Y mit 11,8 m aus. κ wirkt vor allem in X, allerdings nur mit 1,0 m, da für diese Abschätzung die halbe Streifenbreite am Boden ausschlaggebend ist.



(a) φ (b) ω (c) κ

Abbildung 5.11. Verbesserungen der Lagewinkel an den Orientierungspunkten in Streifen h2063_0000 mit Modellvariante 3

Keine Änderung in der Genauigkeit zeigt sich bei den Objektpunktkoordinaten. Ebenso bleibt der RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten unverändert. Der RMS der Höhendifferenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM liegt wieder nahezu unverändert bei 32,1 m. Allerdings weist die ausgleichende Ebene in Flugrichtung X eine leichte Verkippung zum MOLA DGM auf. Die Anzahl der HRSC Objektpunkte ändert sich wiederum nur unmerklich.

5.3.2.5 Diskussion der verschiedenen Varianten

In den letzten Abschnitten wurde das Modell variiert um es zu vereinfachen, d.h. um weniger Parameter in der Ausgleichung schätzen zu müssen. Dargestellt wurden für Streifen h2063$_{0000}$ die Ergebnisse und die Genauigkeiten, die mit jeder Modellvariante erzielt werden konnten. Grundsätzlich ergeben die Untersuchungen, dass sich durch ein Nichtschätzen bestimmter Parameter der Drift die Genauigkeit der anderen geschätzten Parameter der äußeren Orientierung steigern lässt, ohne die Ergebnisse zu verschlechtern.

Bei genauerer Betrachtung scheint es, dass sich mit Variante 3 (siehe Abschnitt 5.3.2.4) die besten Ergebnisse erzielen lassen. Ein Unterschied zu Variante 2 (siehe Abschnitt 5.3.2.3) zeigt sich lediglich bei der Verkippung der HRSC Objektpunkte in Bezug auf das MOLA DGM. Während in den mit Variante 2 berechneten Ergebnissen keine Verkippung feststellbar ist, findet sich für ΔZ_X in Variante 3 eine solche. Da sich in diesem Fall das Ergebnis verschlechtert, wird Variante 3 verworfen und die mit Variante 2 erzeugten Ergebnisse werden als optimal angesehen. Ein scheinbarer Genauigkeitsverlust in σ_{Z_B} kann hierbei durch die vorhandenen Korrelationen zwischen Bias Z_B und der Drift Z_D erklärt werden. Da diese Korrelation keinen Einfluss auf die theoretische Standardabweichung der Objektpunktkoordinaten hat, kann aus Sicht der Objektpunktkoordinaten ebenfalls Variante 2 als optimal bezeichnet werden. Bei dem RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten, den Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM (sowohl Abbildungen als auch RMS) sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den gewählten Varianten erkennbar. Daher beeinflussen diese Ergebnisse die Wahl der endgültigen Modellvariante nicht.

Geringe Korrelationen sind bei allen Modellvarianten zwischen den Parametern Y_B und ω_m der äußeren Orientierung erkennbar. Wird einer dieser Parameter nicht geschätzt, so führt dies allerdings zu einem nicht hinnehmbaren Modellfehler. Trotz der Korrelation von Y_B und ω_m haben diese im Objektraum vor allem auf die Z-Komponente unterschiedliche Wirkung. Diesbezügliche Untersuchungen, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird, bestätigen diese Überlegungen. Des Weiteren hat diese Korrelation keinen signifikanten Einfluss auf die Objektpunktkoordinaten, da die Objektpunkte in der X- bzw. Y Achse etwa die gleichen Genauigkeitswerte aufweisen. Somit kann die Korrelation zwischen Y_B und ω akzeptiert werden.

Die Ausgleichung der anderen 12 ausgewählten Streifen mit allen Modellvarianten und die Untersuchung der Ergebnisse zeigt, dass die absoluten Werte und theoretischen Standardabweichungen für alle untersuchten Größen von Streifen zu Streifen abweichen. Dies ist auch zu erwarten, da die Bilder aus unterschiedlichen Flughöhen und mit verschiedenen MPFen aufgenommenen wurden (siehe Tabelle 5.5). Die Argumentationen und Folgerungen, die anhand des Streifens h2063$_{0000}$ zur Wahl der endgültigen Modellvariante geführt haben, sind aber auf alle anderen 12 Streifen übertragbar.

5.3.3 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Streifen

Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Streifen zeigt sich, dass die geforderte Flugzeit zwischen den Orientierungspunkten von 10 Sekunden für fast alle Streifen eingehalten wird. Aufgrund fehlender Punkte aus dem Bildzuordnungsverfahren im nördlichen Teil des Streifens h1943$_{0000}$, welche auf kleine Datenlücken zurückzuführen sind, musste der Abstand zwischen den Orientierungspunkten für diesen Streifen auf 31 Sekunden erhöht werden. Im Folgenden wird auf ausgewählte Ergebnisse der Bündelausgleichung der 12 Streifen näher eingegangen.

5.3.3.1 RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten

Der RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten nach der Ausgleichung ist in erster Linie abhängig von den unterschiedlichen MPFen der vorliegenden Bilder (siehe Tabelle 5.11). Bei Streifen, für die drei Bilder (ND, S1 und S2) im MPF 1 vorhanden sind (**Gruppe A**), liegt der verbleibende RMS im Allgemeinen bei 1 – 1,5 μm (0,14 – 0,21 Pixel bei einer Pixelgröße von 7 μm), kann aber, je nach Textur, besser (0,6 μm) oder schlechter (2,5 μm) ausfallen.

Sind die Bilder für den ND Sensor in MPF 1 und für die Sensoren S1, S2, P1, P2 in MPF 2 vorhanden (**Gruppe B**), so liegt der RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten zwischen 2,7 – 3,3 μm (0,19 – 0,24 Pixel bei einer Pixelgröße von 14 μm). Die Verbesserungen sind mit den Verbesserungen der Bildkoordinaten aus Gruppe A vergleichbar.

Sind zusätzlich Bilder der multispektralen Sensoren in MPF 4 vorhanden (**Gruppe C**) liegt der RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten im Bereich von 4,6 – 4,9 μm (0,23 – 0,25 Pixel bei einer Pixelgröße von 14 und 28 μm). Diese Werte sind ebenfalls mit den Werten aus Gruppe A und Gruppe B vergleichbar.

Streifen	mittlere Flughöhe über Grund [km]	Bildzuordnung in MPF	RMS Bild-koordinaten [μm]	Gruppe
h0997$_{0001}$	274	1	1,1	A
h1011$_{0000}$	328	2	3,1	B
h1019$_{0000}$	293	2	2,7	B
h1022$_{0000}$	292	2	3,3	B
h1354$_{0000}$	358	2/4	4,9	C
h1929$_{0000}$	528	1	2,5	A
h1933$_{0001}$	345	2	3,0	B
h1943$_{0000}$	407	2	3,3	B
h2007$_{0000}$	304	1	1,4	A
h2025$_{0000}$	323	1	0,6	A
h2063$_{0000}$	312	2/4	4,6	C
h2074$_{0000}$	320	2	2,8	B

Tabelle 5.11. RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten der 12 Streifen

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass sich der RMS der Verbesserungen der Bildkoordinaten weitgehend so verhält wie erwartet. Er ist außerdem unabhängig von der Anzahl der verwendeten Parameter der unbekannten äußeren Orientierung. Da sich aber die Streifen z.B. durch unterschiedliche Textur voneinander zum Teil stark unterscheiden und daher Ergebnisse der Bildzuordnung unterschiedlicher Qualität in die Ausgleichung einfließen, zeigen sich auch große Unterschiede zwischen Beispielen mit fast gleicher Aufnahmekonfiguration.

5.3.3.2 Theoretische Standardabweichungen der HRSC Objektpunkte

Die theoretischen Standardabweichungen der HRSC Objektpunkte hängen neben dem MPF der Bilder und der Flughöhe von der Genauigkeit der verbesserten äußeren Orientierung selbst ab, die wiederum von den Neigungen des Geländes beeinflusst wird. Bei Berücksichtigung dieser Faktoren lassen sich die 12 Streifen wieder in 3 Gruppen unterteilen (siehe Tabelle 5.12).

Streifen	mittl. Flughöhe über Grund [km]	Bildzuordn. in MPF	mittl. Gelände-neigung [%]	Objektpunkte σ_X[m]	σ_Y [m]	σ_Z [m]	Gruppe
h0997$_{0001}$	274	1	11	2,5	3,3	5,1	1
h1011$_{0000}$	328	2	4	6,5	6,9	9,8	2
h1019$_{0000}$	293	2	3	16,8	15,9	9,2	3
h1022$_{0000}$	292	2	10	5,7	6,8	10,0	2
h1354$_{0000}$	358	2/4	6	21,9	21,1	15,2	3
h1929$_{0000}$	528	1	9	8,7	8,9	21,0	1
h1933$_{0001}$	345	2	4	46,3	57,6	13,2	3
h1943$_{0000}$	407	2	5	19,0	20,4	20,3	3
h2007$_{0000}$	304	1	5	4,1	4,6	6,7	1
h2025$_{0000}$	323	1	7	2,8	4,0	3,3	1
h2063$_{0000}$	312	2/4	8	7,8	8,0	11,9	2
h2074$_{0000}$	320	2	4	7,4	8,9	10,6	2

Tabelle 5.12. Theoretische Standardabweichungen der HRSC Objektpunkte der 12 Streifen

In **Gruppe 1** finden sich Streifen, in denen Bilddaten aus 3 Sensoren im MPF 1 vorliegen und das Gelände für die Bestimmung der äußeren Orientierung ausreichende Geländeneigungen aufweist. Die theoretischen Standardabweichungen der X/Y-Komponenten der HRSC Objektpunkte sind hier um

Faktor 1 – 2 besser als die Z-Komponente. Die Genauigkeit der Z-Komponente hängt hauptsächlich von den Konvergenzwinkeln der Stereosensoren der Kamera ab. Die Schätzbarkeit der Z-Komponente wird jedoch durch das DGM verbessert. In dieser Gruppe findet sich auch der Streifen h2025$_{0000}$, der eine ausgezeichnete Textur und Höhenunterschiede von 20 km aufweist. Ebenfalls dieser Gruppe sind die Streifen h0997$_{0001}$ (siehe Abbildung 5.2(e)) und h2007$_{0000}$ (siehe Abbildung 5.2(d)) zugeordnet.
Die Streifen in **Gruppe 2** weisen für alle Bilder der vor- und rückwärts blickenden panchromatischen Sensoren das MPF 2 auf. Zusätzlich ist bei Streifen h2063$_{0000}$ Multispektralinformation vorhanden. Wie bei den Streifen der Gruppe 1 weisen auch hier die Oberflächen ausreichend Geländeneigungen für die Ausgleichungen auf. Aufgrund der niedrigeren Auflösung der Stereokanäle vermindern sich im Allgemeinen die theoretischen Standardabweichungen der Objektpunkte, im Gegensatz zu den Ergebnissen der Streifen aus Gruppe 1. Die X/Y-Komponenten sind um den Faktor 1 – 2 besser schätzbar als die Z-Komponenten. Abbildung 5.2(c) zeigt das Orthophoto des Streifens h2063$_{0000}$.
Die in **Gruppe 3** zusammengefassten Streifen zeigen Geländetypen mit nur geringen oder nur in eine Richtung weisende Geländeneigungen. Hier können die Z-Komponenten der Objektpunkte ebenso genau wie oder besser als die X/Y-Komponenten bestimmt werden. Der Faktor ist vor allem von den Geländeneigungen abhängig. Abbildung 5.2(b) zeigt ein Orthophoto des Streifens h1019$_{0000}$.

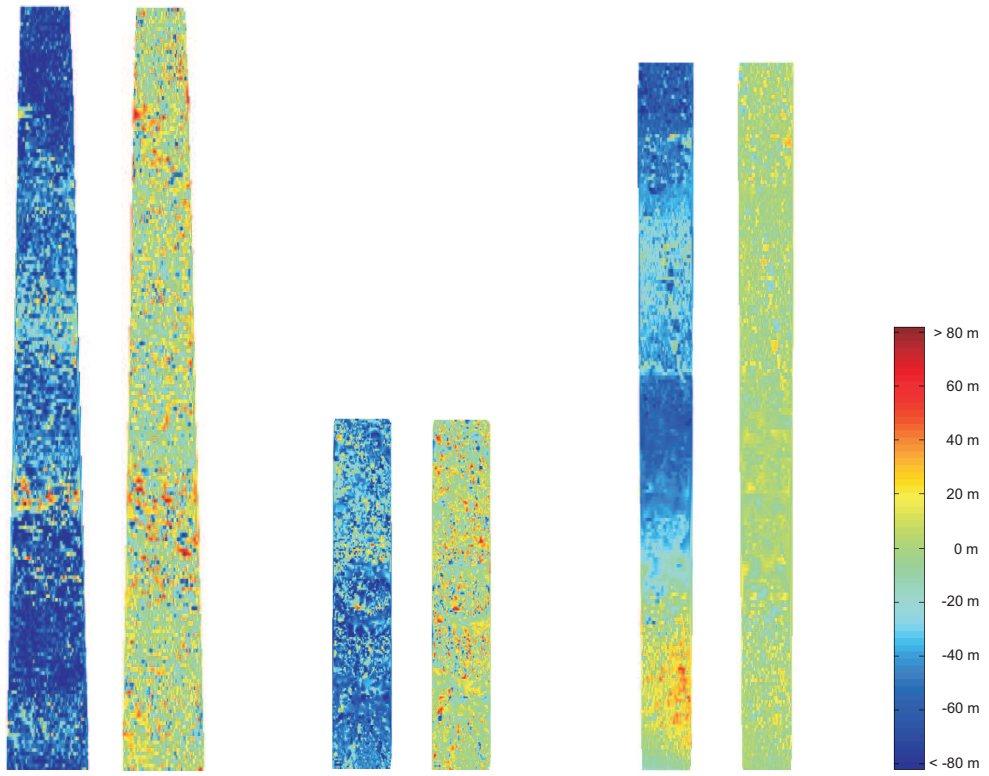
5.3.3.3 Differenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM

Vor der Bündelausgleichung sind erhebliche Differenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM (siehe Tabelle 5.13) vorhanden. Nach der Ausgleichung verringern sich die Differenzen durchschnittlich um den Faktor 2.

Streifen	Z-Diff. (RMS) vor der Ausgl. [m]	Z-Diff. (RMS) nach der Ausgl. [m]	Faktor
h0997$_{0001}$	41,0	33,7	1,2
h1011$_{0000}$	36,3	28,1	1,3
h1019$_{0000}$	25,5	17,0	1,5
h1022$_{0000}$	38,4	32,4	1,2
h1354$_{0000}$	24,0	19,5	1,2
h1929$_{0000}$	72,9	28,9	2,5
h1933$_{0001}$	55,7	18,2	3,1
h1943$_{0000}$	64,6	30,2	2,1
h2007$_{0000}$	50,9	24,4	2,1
h2025$_{0000}$	39,8	11,0	3,6
h2063$_{0000}$	48,2	32,2	1,5
h2074$_{0000}$	54,0	24,1	2,2

Tabelle 5.13. DGM Differenzen der 12 untersuchten Streifen

Die Abbildungen 5.12(a) (Streifen h1929$_{0000}$) und 5.12(c) (Streifen h2007$_{0000}$) spiegeln die in Tabelle 5.13 dargestellte Situation wider. Vor der Ausgleichung bestehen über den ganzen Streifen systematisch Differenzen gegenüber dem MOLA DGM. In Abbildung 5.12(e) (Streifen h2025$_{0000}$) zeigen sich in einigen Regionen kleine und in anderen Teilen des Streifens größere Differenzen. Zusätzlich weist der Streifen deutlich erkennbare Längs- und Querneigung auf. In allen drei Fällen werden durch die Bündelausgleichung die systematischen Abweichungen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM beseitigt (siehe Abbildungen 5.12(b), 5.12(d) und 5.12(f)).
Nach der Ausgleichung sind schließlich nur noch lokale Abweichungen zwischen dem MOLA DGM und den HRSC Objektpunkten sichtbar, die aufgrund des niedrig aufgelösten MOLA DGMs zwischen diesen beiden Datensätzen bestehen können. Die HRSC Objektpunkte und damit die äußere Orientierung der 12 HRSC Streifen können damit als „erfolgreich an das derzeit gültige Referenzsystem des Mars angepasst“ angesehen werden.



(a) vor (b) nach (c) vor (d) nach (e) vor (f) nach

Abbildung 5.12. Z-Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM vor und nach der Ausgleichung

5.3.4 Massendatenauswertung

Das in Abschnitt 5.3.2 beschriebene und in Abschnitt 5.3.3 anhand von 12 Streifen evaluierte Bündelausgleichungsmodell wird in diesem Abschnitt auf alle in den ersten drei Jahren der Mars Express Mission aufgenommenen und grundsätzlich auswertbaren 1200 Einzelstreifen angewandt. Die Ergebnisse der Einzelstreifen werden vor allem anhand der erreichten theoretischen Standardabweichungen der Bündelausgleichung und der verbleibenden Differenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM untersucht.

Nach Auswertung der Ergebnisse aller Streifen ergibt sich folgendes Bild: 988 Einzelstreifen können erfolgreich ausgeglichen und an das MOLA DGM angepasst werden. Dies entspricht einer Erfolgsquote von 82 Prozent. In den restlichen 212 Streifen konnten meist nur wenige Bildkoordinaten zugeordnet werden, da die Streifen entweder sehr kurz sind oder die Bilder eine für die Bildzuordnung unzureichende Textur aufweisen. In den meisten Fällen handelt es sich um Streifen, die vor der Bildzuordnung als „eventuell mittels photogrammetrischer Punktbestimmung auswertbar“ klassifiziert waren (siehe Abschnitt 5.1.1). Nach der Ausgleichung könnten sie als „nicht mittels photogrammetrischer Punktbestimmung auswertbar“ klassifiziert werden. In wenigen Fällen ist die nicht erfolgreiche Auswertung auf Probleme bei der Bündelausgleichung zurückzuführen. Dies ist der Fall, wenn z.B. Polregionen ausgeglichen werden, in denen teilweise kein MOLA DGM vorhanden ist.

Abbildung 5.13 zeigt die RMS Differenzen zwischen dem MOLA DGM und den HRSC Objektpunkten vor und nach der Ausgleichung der 988 erfolgreich ausgeglichenen Einzelstreifen. Der Mittelwert aller RMS Differenzen liegt vor der Ausgleichung bei 82 m. Nach der Ausgleichung kann der Mittelwert auf 36 m gesenkt werden.

Wird der Faktor der Z-Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten vor und nach der Ausgleichung gebildet, so zeigt sich, dass die Anpassung der HRSC Objektpunkte an das MOLA DGM in allen Fällen zu einer Verminderung der Z-Differenzen führt und eine hohe Konsistenz zum MOLA DGM erreicht wird. In keinem Fall kommt es zu einer Verschlechterung der Z-Differenzen nach der Ausgleichung (siehe Abbildung 5.14).

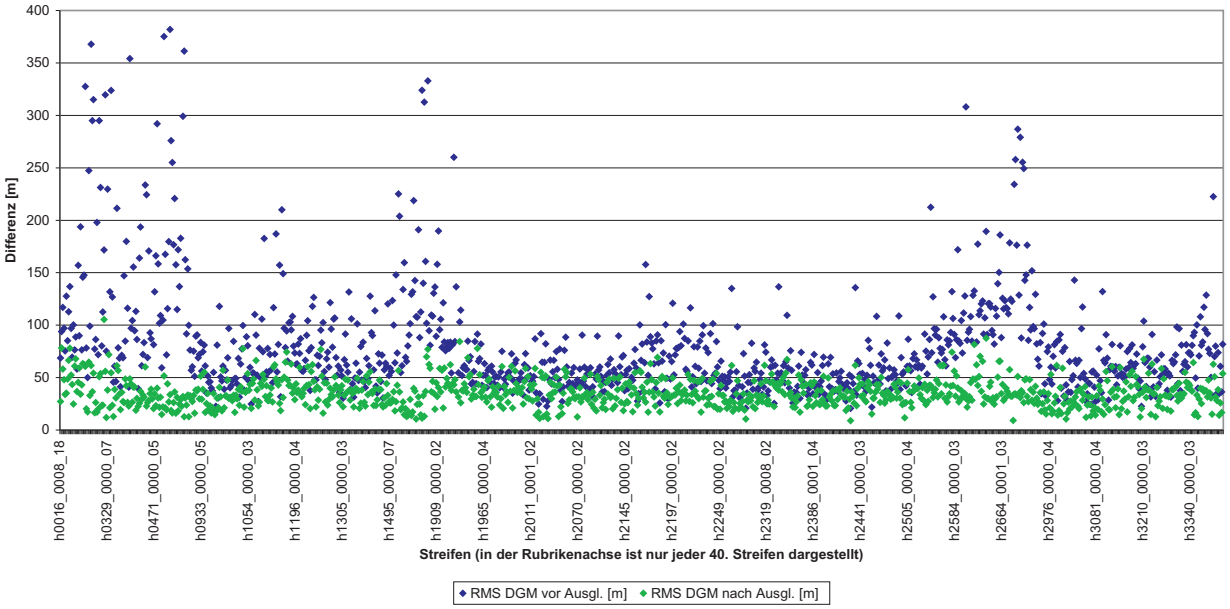


Abbildung 5.13. RMS der Z-Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM der einzelnen Streifen vor und nach der Ausgleichung

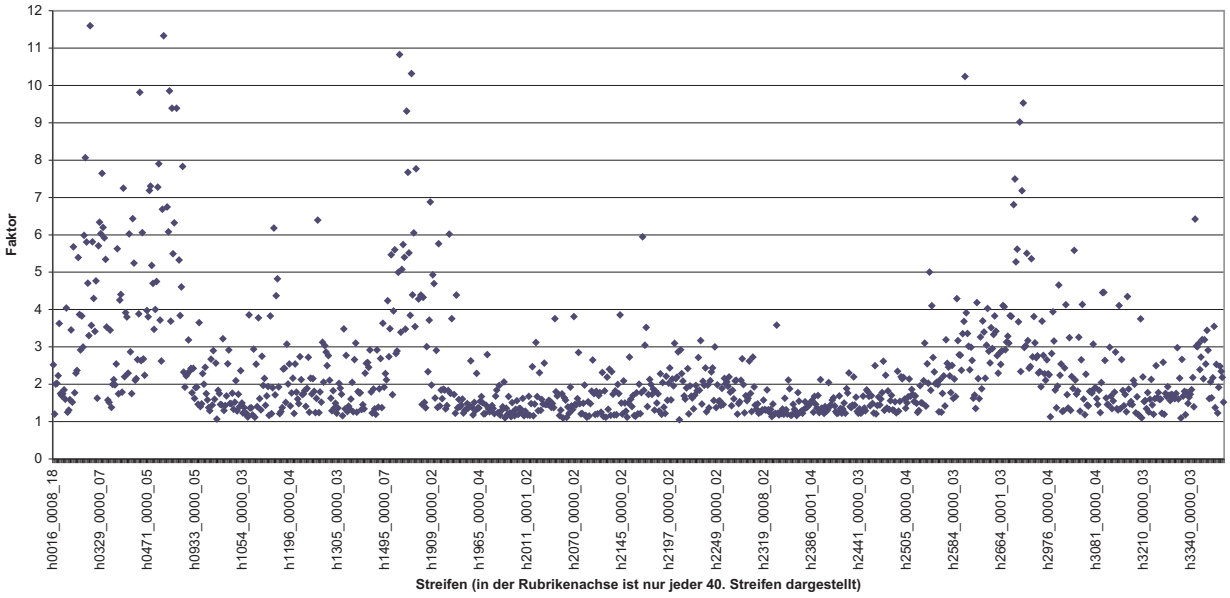


Abbildung 5.14. Faktor zwischen Z-Differenzen vor und nach der Ausgleichung

Ebenso ist es wichtig, die anderen in Abschnitt 5.2.1.4 diskutierten Ergebnisse bei der Massendatenauswertung nicht außer Acht zu lassen. Allerdings können sie aufgrund der großen Anzahl an Ergebnissen in dieser Arbeit nicht detailliert dargestellt werden. Grundsätzlich zeigt sich, dass die anhand des Streifens h2063$_{0000}$ getroffenen Schlussfolgerungen, die zur Wahl der gewählten Modellvariante geführt haben, auch auf die Massendaten anwendbar sind.

Selbstverständlich gibt es bei der Vielzahl von Streifen Fälle, in denen ein oder mehrere Bias- oder Drift-Parameter nicht signifikant geschätzt werden können. In diesen Fällen ist aber der betreffende Wert meist sehr klein. Diese Parameter üben deshalb keinen nennenswerten Einfluss auf die gesamte Ausgleichung aus. Werden ein oder mehrere Parameter nicht signifikant geschätzt und sind die Bias- oder Drift-Parameter außerdem sehr groß, so wird der betreffende Streifen als „nicht erfolgreich ausgeglichen“ klassifiziert.

5.4 Ergebnisse der Ausgleichung von Blöcken

In der laufenden Mars Express Mission werden immer mehr Einzelstreifen aufgenommen, aus denen Blöcke gebildet werden können (siehe Abschnitt 5.1.1.6). Untersucht wird in diesem Abschnitt exemplarisch ein, aus drei parallel liegenden Einzelstreifen (h0894$_{0000}$, h0905$_{0000}$, h0927$_{0000}$) gebildeter Block, der im September/Oktober 2004 aus einer Flughöhe zwischen 325 und 647 km über dem Nanedi Vallis aufgenommen wurde. Die Querüberdeckung zwischen den Streifen beträgt etwa 10 Prozent. Der Streifen h0927$_{0000}$ weist Datenlücken in S1 und S2 an zwei Stellen auf. Deswegen ist eine Nutzung von 2-Strahlpunkten in diesen Gebieten unbedingt erforderlich, um keine Lücke im Objektraum entstehen zu lassen, die zu einer Verringerung der Anzahl der Orientierungspunkte führen könnte. Für die Bündelausgleichung des Blocks wird als Grundlage die Modellvariante 2 (siehe Abschnitt 5.3.2.3) verwendet. Es werden Bildkoordinaten des Bildzuordnungsprogramms HWMatch1 genutzt (siehe Abschnitt 5.1.2.1).

In den Grafiken, in denen der Block als Gesamtes dargestellt ist (siehe Abbildungen 5.15 bis 5.19), findet sich der Streifen h0894$_{0000}$ auf der rechten Seite (Osten), der Streifen h0905$_{0000}$ in der Mitte und der Streifen h0927$_{0000}$ auf der linken Seite (Westen) des Blocks.

5.4.1 Äußere Orientierung

Zunächst wird der Block wieder zu Einzelstreifen aufgetrennt und die Streifen unabhängig voneinander ausgeglichen, um grobe Fehler zu detektieren (siehe Abschnitt 5.2.2). Tabelle 5.14 zeigt die Ergebnisse der äußeren Orientierung für die drei Einzelstreifen, die im großen und ganzen den Ergebnissen für Einzelstreifen entsprechen (siehe Abschnitt 5.3.2.3). Da allerdings die Flughöhe in diesem Beispiel größer ist und 2-Strahlpunkte genutzt werden müssen, sind die theoretischen Standardabweichungen der äußeren Orientierung etwas schlechter. Einige Parameter der äußeren Orientierung sind nicht oder nur gering signifikant schätzbar. Diese Parameter haben aufgrund ihrer geringen Bias- oder Drift-Werte aber keinen nennenswerten Einfluss auf die gesamte Ausgleichung.

Streifen	X_B	σX_B	Y_B	σY_B	Z_B	σZ_B	Z_D	σZ_D
h0894$_{0000}$	-65 m	**10,1 m**	241 m	**14,9 m**	-105 m	**13,3 m**	33 m	**21,2 m**
h0905$_{0000}$	-102 m	**8,4 m**	95 m	**12,4 m**	5 m	**10,5 m**	-15 m	**17,1 m**
h0927$_{0000}$	45 m	**10,6 m**	14 m	**14,4 m**	-11 m	**12,9 m**	37 m	**24,1 m**

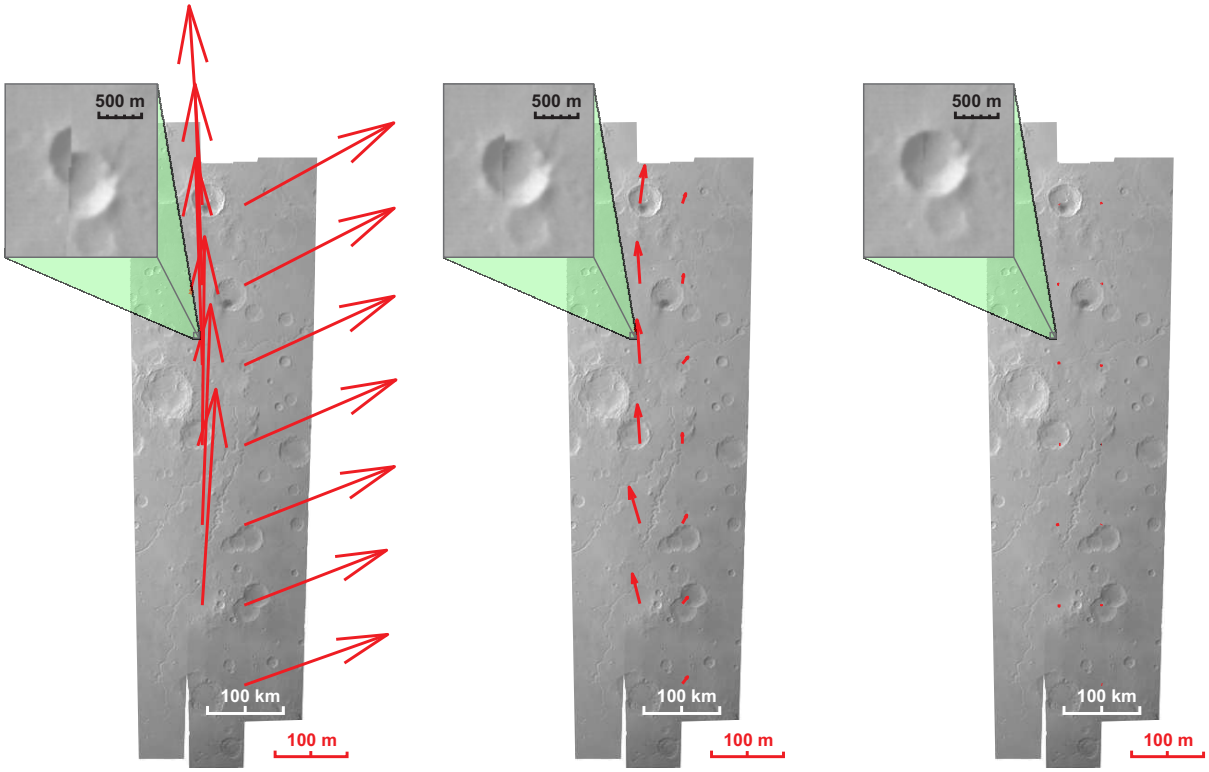
Tabelle 5.14. Unabhängig voneinander ausgeglichene Einzelstreifen des Blocks

Werden die Streifen in einem Block ausgeglichen, kann eine Genauigkeitssteigerung erreicht werden. Tabelle 5.15 zeigt die etwa um Faktor 1,7 (im Vergleich zu Tabelle 5.14) verbesserten theoretischen Standardabweichungen der Parameter der äußeren Orientierung. Diese Genauigkeitssteigerung ergibt sich durch etwa die dreifache Anzahl an HRSC Objektpunkten, die gemeinsam an das DGM angepasst werden können. Die Werte der Parameter X_B, Y_B, Z_B und Z_D ändern sich durch die Verknüpfung der Streifen zum Block ebenfalls, da die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte ein höheres Gewicht als das DGM haben. D.h. die Einzelstreifen werden durch die Bildkoordinaten zu einem Block verknüpft und gemeinsam an das DGM angepasst. Beim Vergleich der Werte der Parameter Z_B und Z_D (siehe Tabelle 5.15) mit den Ergebnissen der Einzelstreifen (siehe Tabelle 5.14) sollte beachtet werden, dass Korrelationen zwischen diesen beiden Parametern bestehen und daher diese Änderungen nicht notwendigerweise zu einem anderen Ergebnis in den Objektpunktkoordinaten führen müssen (siehe Abschnitt 5.4.3).

Streifen	X_B	σX_B	Y_B	σY_B	Z_B	σZ_B	Z_D	σZ_D
h0894$_{0000}$	-90 m	**6,0 m**	241 m	**10,8 m**	-116 m	**8,1 m**	-63 m	**13,0 m**
h0905$_{0000}$	-118 m	**5,6 m**	76 m	**9,4 m**	1 m	**6,8 m**	-7 m	**11,5 m**
h0927$_{0000}$	106 m	**6,3 m**	-9 m	**11,1 m**	33 m	**8,2 m**	71 m	**15,8 m**

Tabelle 5.15. Streifen im Block ausgeglichen

In Abbildung 5.15(a) sind die Differenzen der Streifen zueinander vor der Ausgleichung mit der nominellen Orientierung, in Abbildung 5.15(b) nach der Ausgleichung der Einzelstreifen und in Abbildung 5.15(c) nach der Ausgleichung des ganzen Blocks jeweils für die X/Y-Komponente dargestellt. Die Differenzen werden für HRSC Objektpunkte berechnet, wenn diese im Überlappungsbereich der Streifen liegen (siehe Abschnitt 5.2.2.4). Pro Kachel wird wiederum ein einziger quadratischer Mittelwert dargestellt. Ebenfalls zeigt ein kleiner Krater mit einem Durchmesser von etwa 500 m eindrucksvoll die erzielten Ergebnisse.



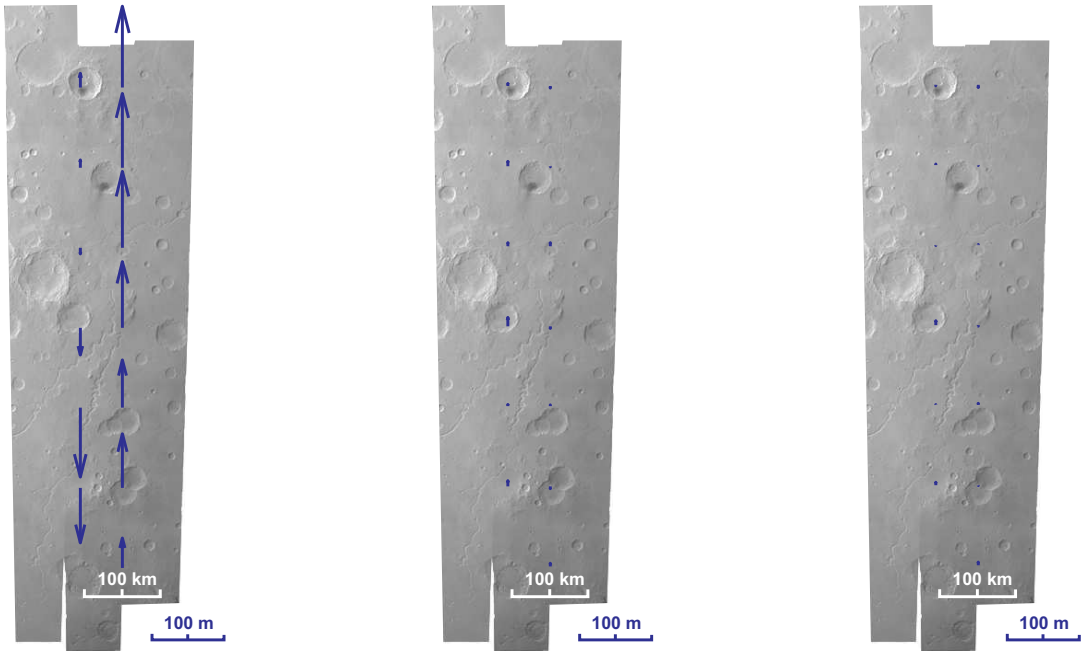
(a) vor der Ausgleichung (b) Ausgl. der Einzelstreifen (c) Ausgleichung im Block

Abbildung 5.15. Differenzen von Streifen zu Streifen in X/Y

Abbildung 5.15(a) zeigt größere systematische Verschiebungen im Überlappungsbereich zwischen den Streifen vor der Ausgleichung. Der quadratische Mittelwert der X/Y-Komponente für beide Überlappungsbereiche beträgt 117 m. Werden die Streifen einzeln an das DGM angepasst, sind noch kleine systematische Differenzen zu erkennen (siehe Abbildung 5.15(b)). Bei genauerer Betrachtung ist zwischen dem linken und dem mittleren Streifen eine Verkantung der Streifen zueinander, d.h. eine Drehung um die Z-Achse eines Streifens in Bezug zum anderen Streifen, erkennbar. Der quadratische Mittelwert beträgt ebenfalls noch 15 m in der X/Y-Komponente. Wird eine Bündelausgleichung des Blocks vorgenommen, sind keine systematischen Verschiebungen der Streifen zueinander mehr vorhanden (siehe Abbildung 5.15(c)). Ebenfalls ist die Verkantung des linken gegenüber dem mittleren Streifen nicht mehr sichtbar. Die Verschiebungen betragen im quadratischen Mittel nur noch 3 m.

Die Z-Differenzen der Streifen zueinander sind vor der Ausgleichung in Abbildung 5.16(a), die Z-Differenzen nach der Ausgleichung der Einzelstreifen in Abbildung 5.16(b) und die verbleibenden Differenzen nach der Ausgleichung des ganzen Blocks in Abbildung 5.16(c) jeweils für die Z-Komponente dargestellt. Die Länge der Pfeile in den Abbildungen gibt die Größe der Differenzen an. Die Richtung der Pfeile hat hier keine Bedeutung.

Wie schon bei den X/Y-Differenzen zeigt Abbildung 5.16(a) größere systematische Abweichungen im Überlappungsbereich zweier Streifen. Der quadratische Mittelwert der Z-Komponente für beide Überlappungsbereiche beträgt 82 m. Ebenfalls sind Längsneigungen der Streifen in Bezug zum jeweiligen benachbarten Streifen erkennbar. Werden die Streifen einzeln an das DGM angepasst, sind fast keine



(a) vor der Ausgleichung (b) Ausgl. der Einzelstreifen (c) Ausgleichung im Block

Abbildung 5.16. Differenzen von Streifen zu Streifen in Z

systematischen Abweichungen mehr erkennbar (siehe Abbildung 5.16(b)) und die quadratischen Mittelwerte betragen ebenfalls nur 16 m. Wird eine Bündelausgleichung im Block vorgenommen, ist kaum noch eine Steigerung möglich (siehe Abbildung 5.16(c)). Der quadratische Mittelwert der Differenzen kann geringfügig auf 15 m gesenkt werden.

Die Ergebnisse der Bündelausgleichung des Blocks bestätigen die guten Resultate, die bei der Bündelausgleichung von Einzelstreifen und der Anpassung ans DGM erreicht werden können. Die Bündelausgleichung des Blocks führt vor allem zu besseren Ergebnissen in der X/Y-Komponente. Die Ausgleichung von Einzelstreifen arbeitet bei der Verringerung der Z-Differenzen weitgehend zuverlässig und kann durch die Bündelausgleichung im Block kaum mehr übertroffen werden. Eine Ausgleichung mehrerer Streifen als Block ist daher vor allem für die X/Y Komponenten wichtig.

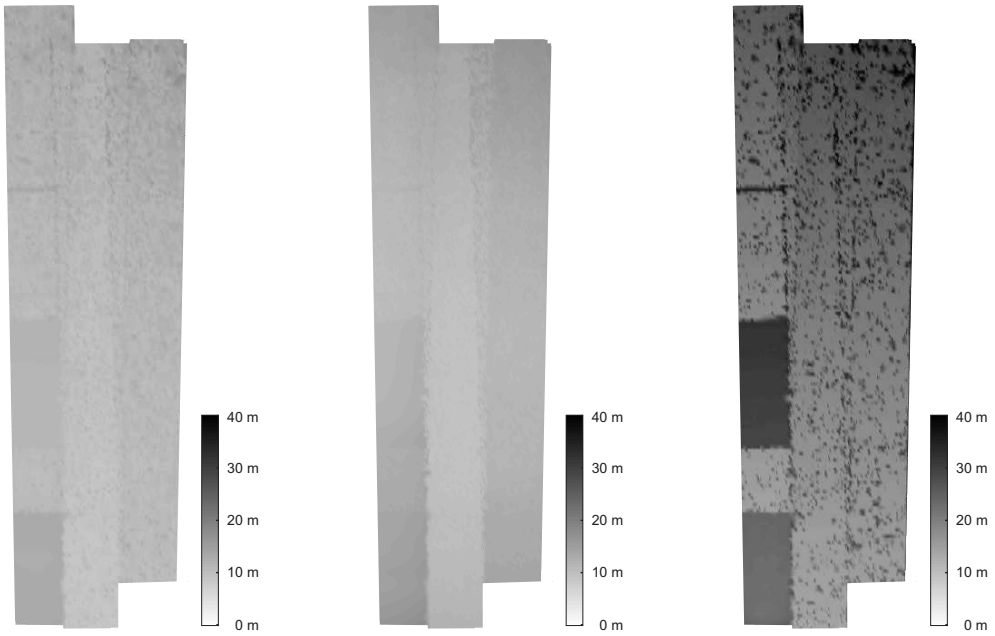
5.4.2 Genauigkeit der HRSC Objektpunkte

Die quadratischen Mittelwerte der theoretischen Standardabweichungen der Objektpunkte sind in Tabelle 5.16 für die Bündelausgleichung als Einzelstreifen und im Block jeweils für X, Y und Z angegeben. Werden die Streifen als Block ausgeglichen, so erhöht sich die Genauigkeit der HRSC Objektpunkte in der X-Komponente um den Faktor 1,3 und in der Z-Komponente um den Faktor 1,1 gegenüber den Ergebnissen der Einzelstreifen. Für die Y-Komponente ergibt sich sogar eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 1,6. Die hohe Steigerung der Genauigkeit der Y-Komponente lässt sich auf die höhere Stabilität des Blocks vor allem quer zur Flugrichtung zurückführen. Da die HRSC Objektpunkte schon als Einzelstreifen gut an das MOLA DGM angepasst werden können, wird nur eine geringe Genauigkeitssteigerung der Z-Komponente nach der Ausgleichung im Block erreicht. An diesen Ergebnissen zeigt sich, dass eine Ausgleichung mehrerer Streifen als Block für die X/Y Komponente wichtiger als für die Z-Komponente ist.

	X	Y	Z
Einzelstreifen	**11,4 m**	**12,1 m**	**23,3 m**
Block	**8,6 m**	**7,8 m**	**20,9 m**

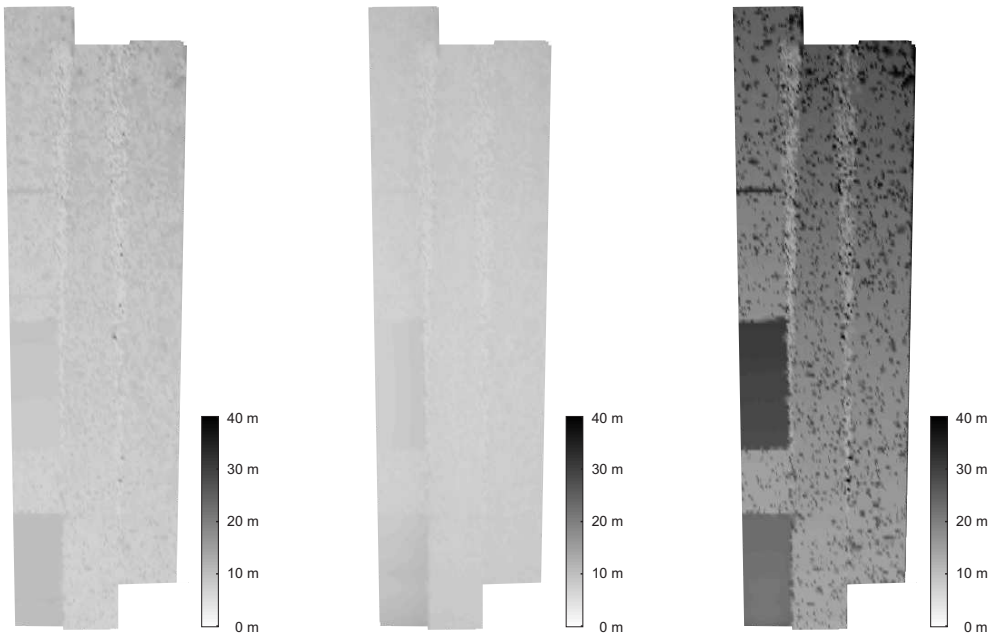
Tabelle 5.16. Quadr. Mittelwerte der theoretischen Standardabweichungen der Objektpunkte

Abbildung 5.17 zeigt die Verteilung der theoretischen Standardabweichungen der Objektpunkte des gesamten Gebiets (Ausgleichung als Einzelstreifen). Im nördlichen Teil des Gebiets sind die Genauigkeiten aller drei Komponenten aufgrund der größeren Flughöhe im Gegensatz zum südlichen Teil schlechter. Zusätzlich finden sich in lokalen Gebieten zum Teil deutlich reduzierte Genauigkeiten, die auf die Nutzung von 2-Strahlpunkten zurückzuführen sind. Im linken Streifen befinden sich im südlichen Teil, wie bereits ausgeführt, zwei größere Gebiete, wo ebenfalls großflächig nur 2-Strahlpunkte vorhanden sind.



(a) σ_X (b) σ_Y (c) σ_Z

Abbildung 5.17. HRSC Objektpunkte - Ausgleichung der Einzelstreifen



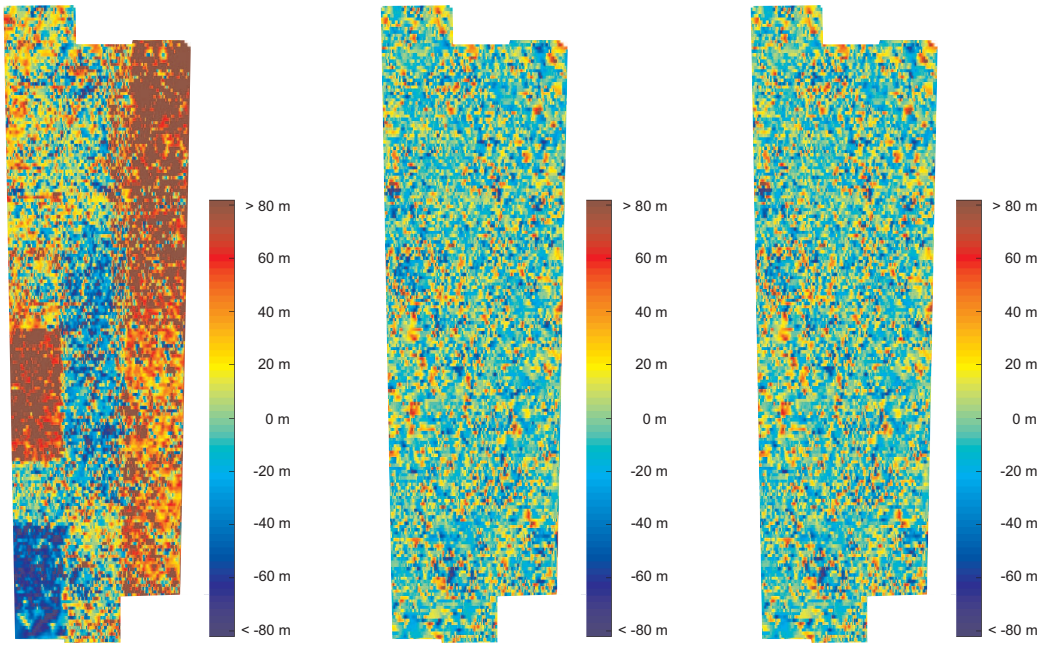
(a) σ_X (b) σ_Y (c) σ_Z

Abbildung 5.18. HRSC Objektpunkte - Ausgleichung des Blocks

Die Ergebnisse der Bündelausgleichung des Blocks (siehe Abbildung 5.18) zeigen, dass sich die theoretischen Standardabweichungen, wie schon in Tabelle 5.16 dargestellt, über das gesamte Gebiet verbessern lassen und über das gesamte Gebiet homogener verteilt sind. Größere Verbesserungen der theoretischen Standardabweichungen sind allerdings in den Überlappungsbereichen sichtbar, da hier die Objektpunkte bei der Ausgleichung im Block meist aus 4 – 6 Bildkoodinatenpaaren mit einer deutlich besseren Strahlengeometrie gebildet werden.

5.4.3 Differenz zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM

Die Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM verhalten sich ähnlich wie bei Einzelstreifen (siehe Abschnitt 5.3.3.3). Vor der Ausgleichung finden sich größere systematische Abweichungen zum DGM sowohl innerhalb eines Einzelstreifens als auch zwischen den verschiedenen Streifen (siehe Abbildung 5.19(a)). Nach der Bündelausgleichung der einzelnen Streifen bzw. der Bündelausgleichung im Block sind keine systematischen Z-Differenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM mehr erkennbar (siehe Abbildungen 5.19(b) und 5.19(c)).



(a) vor der Ausgleichung (b) Ausgl. der Einzelstreifen (c) Ausgleichung im Block

Abbildung 5.19. Z-Differenzen zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM vor und nach der Ausgleichung des Blocks

Lediglich beim RMS der Z-Differenzen ist eine Verbesserung nach der Bündelausgleichung zwischen den Ergebnissen der Einzelstreifen und des Blocks zu erkennen (siehe Tabelle 5.17). In beiden Fällen ist dies eine Verbesserung zum Fall ohne Ausgleichung um einen Faktor von knapp 3.

	Z-Diff. (RMS)
vor der Ausgleichung	90,1 m
nach der Ausgleichung der Einzelstreifen	36,1 m
nach der Ausgleichung des Blocks	34,9 m

Tabelle 5.17. Differenzen zwischen HRSC und MOLA DGM

Nach der Ausgleichung sind ebenfalls keine Längs- und Querneigungen gegenüber dem MOLA DGM mehr in den Abbildungen 5.19(b) und 5.19(c) sichtbar.

5.5 Konvergenzverhalten der Bündelausgleichung

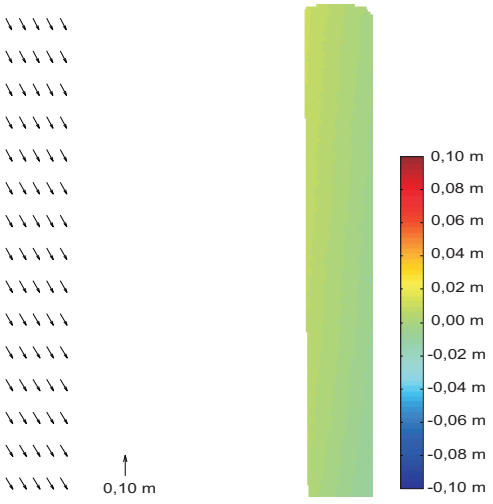
Die gemessenen Bahn- und Lagedaten können Fehler um bis zu 2 km bzw. um bis zu 28 mgon aufweisen (siehe Abschnitt 2.3.3). Daher ist es notwendig, Untersuchungen durchzuführen, die zum Ziel haben, das Konvergenzverhalten der Ausgleichung zu ermitteln, d.h. wie sich veränderte Parameter der äußeren Orientierung und die damit ebenfalls geänderten Näherungswerte der Objektpunktkoordinaten auf das Konvergenzverhalten auswirken. Sinnvoll sind hierfür empirische Untersuchungen für einen Streifen.

Als Beispiel dient hier wieder Streifen h2063$_{0000}$, der jeweils mit unterschiedlichen Näherungswerten für die äußere Orientierung ausgeglichen wird. Geändert werden kann die äußere Orientierung pro Zeilenbild entweder nur für einzelne Parameter (X, Y, Z, φ, ω oder κ), oder es können mehrere Parameter gleichzeitig geändert werden. Unverändert bleiben die Beobachtungen der Bildkoordinaten und das MOLA DGM.

Mit der geänderten äußeren Orientierung wird eine vollständige Bündelausgleichung mit dem in Abschnitt 5.2.1 dargestellten Auswertekonzept, d.h. mit der zugehörigen Grobfehlersuche, durchgeführt. Um die Ergebnisse der verschiedenen Ausgleichungen zu evaluieren, werden diese einer Referenz gegenübergestellt. Als Referenz dienen die Ergebnisse einer Ausgleichung, die mit unverfälschten Näherungswerten berechnet wird. Das Konvergenzverhalten wird exemplarisch anhand von künstlichen Verfälschungen der Bahndaten untersucht. Es ist davon auszugehen, dass die nachfolgend dargestellten Ergebnisse im Wesentlichen auch für die Lagedaten gelten.

Sollen an den Parametern der Bahn Veränderungen vorgenommen werden, ist es am einfachsten, pro Zeilenbild die Parameter X, Y und/oder Z der äußeren Orientierung vor der Ausgleichung um einen konstanten Wert zu ändern. Zunächst wird für jedes Zeilenbild nur jeweils ein Parameter, d.h. X, Y oder Z um 100 m, 500 m, 1000 m und 5000 m geändert und jeweils eine Ausgleichung berechnet.

Zur Evaluierung werden die Objektpunktkoordinaten der jeweiligen Ausgleichungen der Referenz gegenübergestellt. In allen Fällen ergeben sich maximale Differenzen im Bereich von weniger als einem Meter. Der Grund für diese kleinen Differenzen ist in der Grobfehlersuche zu finden. Denn durch die geänderten Näherungswerte wird eine, wenn auch nur geringfügig andere Anzahl an Bildkoordinaten von der Grobfehlersuche als grobe Fehler klassifiziert und eliminiert.



(a) horizontale Lage (X, Y) (b) Höhe (Z)

Abbildung 5.20. Differenzen zwischen Ergebnissen mit geänderten Näherungswerten und Referenz

Gewöhnlich liegen die Verschiebungen der gemessenen äußeren Orientierung in der horizontalen Position (X, Y) weit unterhalb 2 km. Die Verschiebungen in der Höhe (Z) sind noch geringer. Die Ergebnisse der Massendatenauswertung zeigen, dass bei den Bahnen meist Verschiebungen von weniger als 500 m in X, weniger als 340 m in Y und weniger als 100 m in der Höhe Z angebracht werden müssen. Es wird deshalb ein synthetisches Beispiel erzeugt, in dem die horizontale Lage und die Höhe um ebendiese

Werte geändert werden. Abbildung 5.20 zeigt die Differenzen zwischen den Ergebnissen mit geänderten Näherungswerten und der Referenz. Während die Differenzen in der horizontalen Position etwas weniger als 10 cm betragen, sind in der Höhe die Differenzen mit weniger als 2 cm noch geringer. In allen untersuchten Fällen liegen die Differenzen weit unterhalb der theoretischen Standardabweichung der jeweiligen Werte und können ohne weiteres akzeptiert werden.

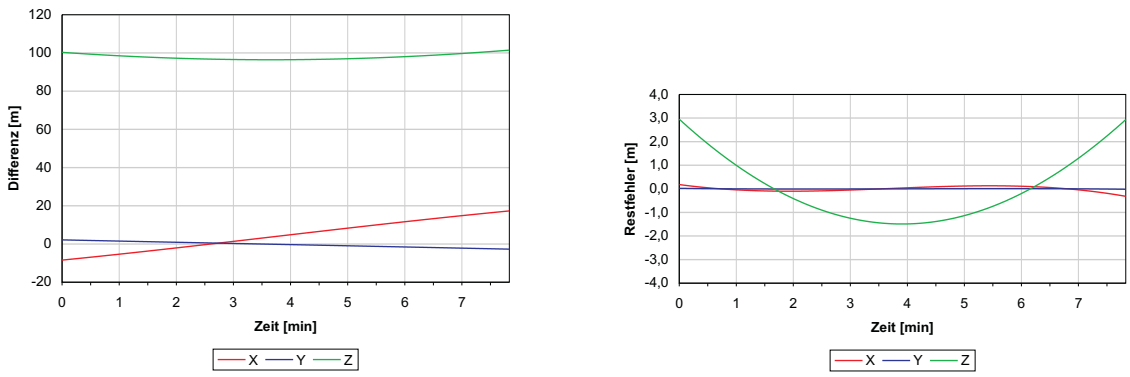
5.6 Abschätzung der Genauigkeit der Bahn

Bei Satellitenbahnen, wie im Fall von Mars Express, scheint es naheliegend, die Bahn nicht, wie zuvor beschrieben, mit Bias und linearer Drift zu verbessern, sondern direkt die Parameter der physikalischen Bahn, d.h den Epoche-Zustandsvektor in Form der Keplerelemente zu verbessern. Für die Mars 96 Mission gab es sinnvolle Gründe, ein entsprechendes Modell zu entwickeln. Die meisten Gründe sind für die Mars Express Mission nicht mehr relevant (siehe Abschnitt 3.3). So können in erster Näherung der Bias und die lineare Drift als Positions- und Geschwindigkeitskomponenten des Epoche-Zustandsvektors angesehen werden.

Vor allem aber würde die Nutzung von bahndynamischen Bedingungen das Ausgleichungsmodell komplizierter machen. Dies liegt daran, dass die Flugbahn von Mars Express als diskretisierte Bahn (Werte für jedes Zeilenbild in X, Y, Z) und nicht in Form von Keplerelementen vorliegt. Auch das inzwischen sehr viel genauer bekannte Schwerefeld ist bereits in den diskretisierten Bahndaten berücksichtigt. Da es außerdem langwieriger und rechentechnisch aufwändiger ist, die Keplerelemente als Unbekannte anzusetzen, wird in diesem Abschnitt untersucht, inwieweit sich durch die Nutzung der Ausgleichung mit Bias und linearer Drift im Gegensatz zur Verbesserung der Keplerelemente Modellfehler ergeben und welche Größenordnung die Restfehler annehmen. Als Beispiel dient wieder der Streifen h2063$_{0000}$.

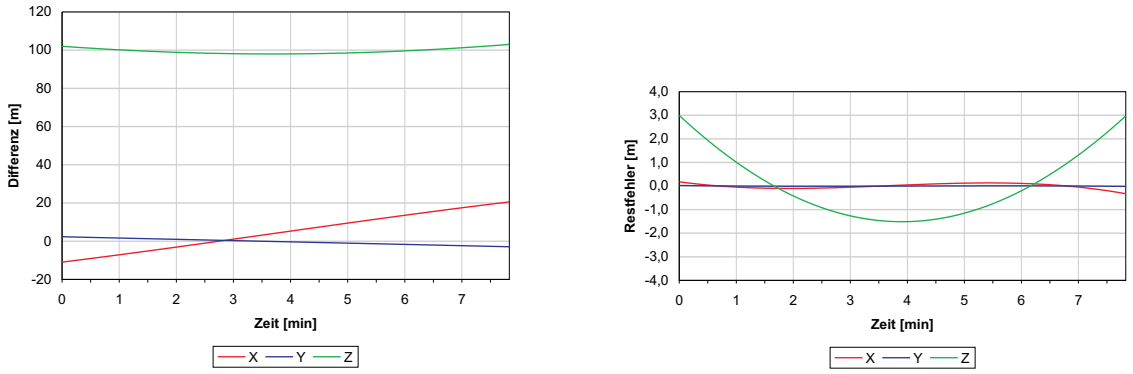
Zunächst wird die diskretisierte Ursprungsbahn in die Keplerelemente überführt (Schneider, 1988; Montenbruck und Gill, 2000). Aus diesen Keplerelementen wird eine neue diskrete Bahn (Bahn 1) berechnet. Im zweiten Schritt werden die einzelnen Werte der Keplerelemente leicht verändert, so dass sich nach der Überführung in eine diskrete Bahn (Bahn 2) Differenzen zur Bahn 1 ergeben. Beide Bahnen werden in ein lokales System transformiert, so dass die X-Achse in Flugrichtung und die Y-Achse quer zur Flugrichtung zeigt. Die Z-Achse verläuft parallel zur Höhe. Die Differenzen der zwei Bahnen liegen für X bei 220 m, für Y bei 150 m und für Z bei 100 m und entsprechen empirisch ermittelten Werten.

Eine Änderung der Gestaltungselemente der großen Halbachse a und der numerischen Anomalie e einer Keplerbahn wirkt sich hauptsächlich auf die Z-Achse aus. Abbildungen 5.21(a) und 5.22(a) zeigen die jeweiligen Differenzen vor der Ausgleichung, die etwa 100 m betragen. Nach einer Ausgleichung in der jeweils für die Werte X, Y und Z ein Bias und eine lineare Drift angesetzt werden, ergeben sich in beiden Fällen (siehe Abbildungen 5.21(b) und 5.22(b)) maximale Restabweichungen im Bereich von 3 m.



(a) vor Ausgleichung (b) nach Ausgleichung

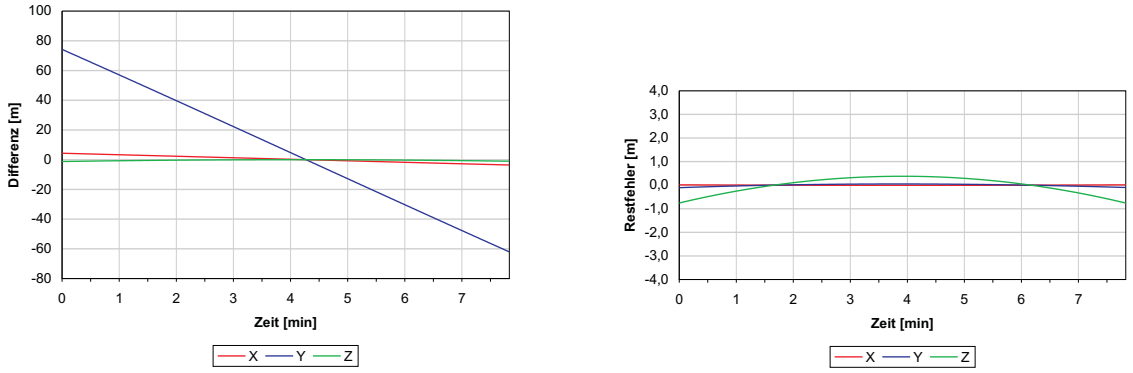
Abbildung 5.21. Große Halbachse a



(a) vor Ausgleichung (b) nach Ausgleichung

Abbildung 5.22. Numerische Anomalie e

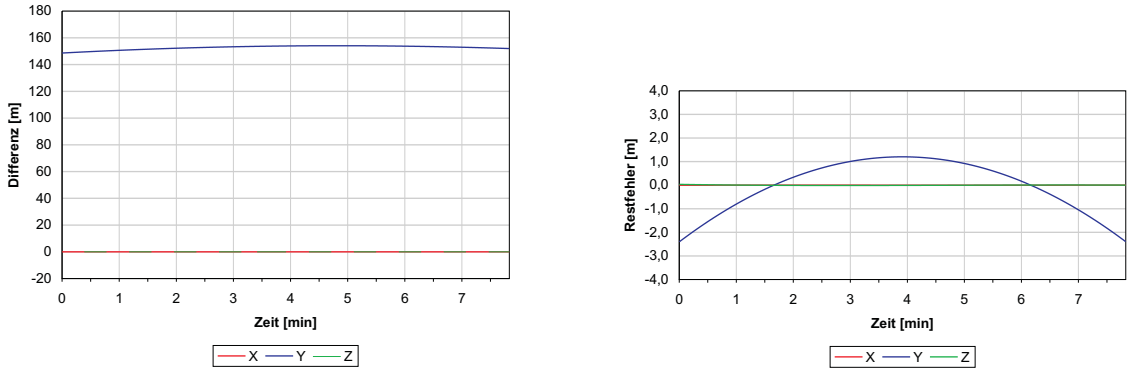
Eine Veränderung der Bahnneigung i wirkt sich hauptsächlich auf Y aus, da die Bahn um die Z-Achse gedreht und in die Y-Richtung verschoben wird (siehe Abbildung 5.23(a)). Nach der Ausgleichung mit Bias und linearer Drift als Unbekannte jeweils in X, Y und Z, liegen die Restfehler (siehe Abbildung 5.23(b)) nur noch bei unter 1 m.



(a) vor Ausgleichung (b) nach Ausgleichung

Abbildung 5.23. Bahnneigung i

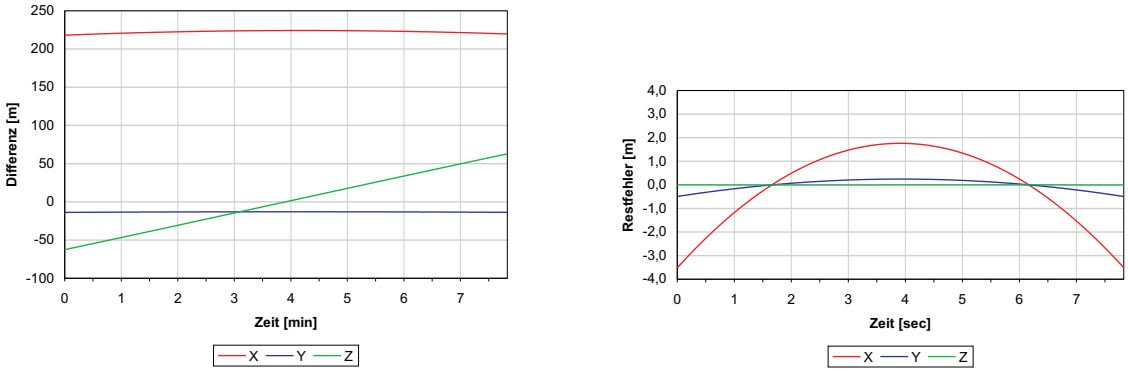
Eine Verschiebung in Y wird durch eine Änderung der Rektaszension Ω erreicht (siehe Abbildung 5.24(a)). Auch hier werden durch die Ausgleichung die verbleibenden Differenzen der beiden Bahnen auf maximal 3 m gesenkt (siehe Abbildung 5.24(b)).



(a) vor Ausgleichung (b) nach Ausgleichung

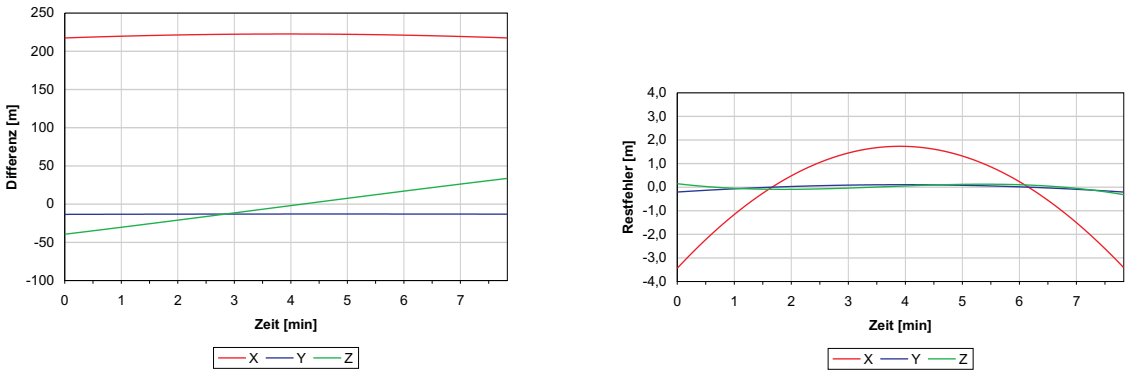
Abbildung 5.24. Rektaszension Ω

Eine Änderung der Perizentrumslage ω oder der Perizentrumsdurchgangszeit t_0 bringt vor allem eine größere Differenz für die X Komponente mit sich (siehe Abbildung 5.25(a) und 5.26(a)). In beträchtlichem Umfang wirken sich derartige Änderungen aber auch auf die Z-Komponente aus. Nach der Ausgleichung verbleiben Differenzen von weniger als 4 m (siehe Abbildungen 5.25(b) und 5.26(b)).



(a) vor Ausgleichung (b) nach Ausgleichung

Abbildung 5.25. Perizentrumslage ω



(a) vor Ausgleichung (b) nach Ausgleichung

Abbildung 5.26. Perizentrumsdurchgangszeit t_0

Die Untersuchungen anderer Streifen, bei denen das Perizentrum nicht innerhalb der Streifen liegt, ergeben vor der Ausgleichung andere Differenzen. Nach der Ausgleichung mit Bias und Drift liegen die Restfehler in der Größenordnung des untersuchten Streifens h2063$_{0000}$. Werden hingegen die Verschiebungen um Faktor 3 vergrößert, so erhöhen sich auch die Restdifferenzen um den gleichen Faktor. Dies führt zu verbleibenden Restdifferenzen von weniger als 10 m.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die bei Mars Express auftretenden Verschiebungen durch eine Ausgleichung mit Bias und linearer Drift anstatt der Keplerelemente als Unbekannte modelliert werden können. Der verbleibende Modellfehler, d.h. die verbleibenden Restfehler von den mit Bias/Drift modellierten Verbesserungen zu einer mit Keplerelementen modellierten, physikalisch korrekten Bahn beträgt nur wenige Meter in allen drei Koordinatenachsen.

6. Simultane Schätzung der inneren und äußeren Orientierung

In diesem Kapitel werden die Parameter der inneren Orientierung simultan mit den Parametern der äußeren Orientierung geschätzt. An Streifen h2063$_{0000}$ werden zunächst systematische Fehler in den Verbesserungen der Bildkoordinaten gezeigt. Es wird untersucht, welche Parameter der inneren Orientierung sich simultan mit der äußeren Orientierung signifikant bestimmen lassen. Nach der Bestimmung eines neuen Parametersatzes für die panchromatischen Sensoren werden dessen Auswirkungen auf die Bildkoordinaten bewertet. Schließlich werden die Multispektralkanäle ebenfalls betrachtet und die Parameter der inneren Orientierung für diese Sensoren geschätzt.

6.1 Restfehler ohne verbesserte innere Orientierung

In den Ergebnissen der Bündelausgleichung unter Nutzung nicht verbesserter Parameter der inneren Orientierung, d.h. mit direkt aus der Laborkalibrierung abgeleiteter innerer Orientierung (siehe Abschnitt 4.7) zeigen sich nach der Ausgleichung kleinere Restabweichungen in den Bildkoordinaten aller Sensoren. Da diese Restabweichungen in vielen Streifen ähnlich verteilt sind und ähnliche Sytematiken aufweisen, können sie als Auswirkungen einer fehlerhaften inneren Kamerageometrie angesehen werden.

Abbildung 6.1. Mittlere Restabweichungen in den Bildkoordinaten nach der Ausgleichung ohne verbesserte Parameter der inneren Orientierung

Abbildung 6.1 zeigt die systematischen Abweichungen der Bildkoordinaten des Streifens h2063$_{0000}$ nach einer Ausgleichung, in der nur die Bildkoordinaten der 5 panchromatischen Sensoren verwendet werden. Dies bedeutet, dass zunächst die vorhandene Farbinformation nicht betrachtet wird. Um die Systematiken besser zeigen zu können, wird eine Darstellung wie in Abbildung 5.4(c) verwendet, d.h. jeder Sensor wird in 8 Abschnitte mit je 648 Pixeln unterteilt und jeweils ein Mittelwert dargestellt. Zur Bildung des Mittelwerts eines Abschnitts tragen alle Bildkoordinatenverbesserungen über die gesamte Streifenlänge des betreffenden Abschnitts bei.

6.2 Physikalischer Aufbau der Kamera

Bereits im Abschnitt 2.3.2.3 wird auf den Aufbau der Kamera und die möglichen Auswirkungen des Starts des Raumschiffs auf die einzelnen Sensoren eingegangen. Treten Veränderungen auf, hat dies Einfluss auf die Parameter der inneren Orientierung. Die Verschiebungen auf den Klebefächen, d.h. orthogonal zur optischen Achse, wirken sich vor allem auf die Parameter x_0 und y_0, sowie auf eine Drehung κ des Sensors um die optische Achse der Kamera aus. Eine Verbiegung eines Sensors in der Fokalebene wird nicht erwartet.

Eine Drehung ω einzelner Sensoren um die Flugachse, eine Drehung φ um die Achse quer zur Flugrichtung und eine Änderung des Abstands einzelner Sensoren zum Projektionszentrum wird ebenfalls nicht erwartet. Würde dies trotzdem der Fall sein, müsste sich der betroffene Sensor von der Klebefläche ganz oder teilweise lösen und die elektrische Funktionsfähigkeit des Sensors ginge verloren. Eine Änderung der Kammerkonstante c, d.h. eine Änderung des Abstands der gesamten Fokalebene zum Objektiv wäre denkbar. An den Restabweichungen der Bildkoordinaten nach der Ausgleichung ist dieser Effekt jedoch nicht sichtbar. Vielmehr wird dieser durch den verbesserten Bahnparameter Z der äußeren Orientierung aufgefangen. Ebenso ist eine Verschiebung aller Fokalplatten, d.h. eine gemeinsame Verschiebung aller Sensoren in die gleiche Richtung in den Bildkoordinaten nicht sichtbar. Dieser Effekt wird durch die verbesserten Bahnparameter X und Y der äußeren Orientierung aufgefangen.

6.3 Schätzbarkeit der Parameter der inneren Orientierung ohne DGM

Das in Abbildung 6.1 gezeigte Beispiel lässt vermuten, dass sich die systematischen Restfehler in den Bildkoordinaten nach der Ausgleichung durch eine Verbesserung der Parameter x_0 und y_0 weitgehend beseitigen lassen. Um die Freiheitsgrade der Bündelausgleichung nicht unnötig zu erhöhen, werden deshalb andere Parameter nicht betrachtet. Es wird untersucht, an welchen bzw. an wievielen Sensoren sich die Parameter x_0 und y_0 der inneren Orientierung gemeinsam mit den Parametern der äußeren Orientierung in einer simultanen Ausgleichung bestimmen lassen. Hierfür werden die jeweils zu schätzenden Parameter praktisch als freie Unbekannte, d.h. die Beobachtungsgleichungen erhalten ein niedriges Gewicht, zusätzlich zu den Parametern der äußeren Orientierung in die Ausgleichung eingeführt (siehe Abschnitt 4.7). Um äußere Zwänge zu vermeiden, soll die innere Orientierung nur aus Bildkoordinaten geschätzt werden und die Berechnungen sollen ohne die Nutzung des MOLA DGMs erfolgen. Als unbekannte Parameter der äußeren Orientierung fließen damit nur die Lagewinkel φ_m und κ_m an den Orientierungspunkten in die Ausgleichung ein.

Aus dem physikalischen Aufbau der Kamera und aus Abbildung 6.1 wird abgeleitet, dass die Verbesserungen der Parameter x_0 und y_0 nur wenige μm betragen sollten. Außerdem wird festgelegt, dass sich Parameter der inneren Orientierung mit einer Standardabweichung von weniger als 1 μm schätzen lassen müssen. Treffen beide Kriterien zu, wird der betreffende Parameter der inneren Orientierung im Folgenden als „signifikant schätzbar“, andernfalls als „nicht signifikant schätzbar“ klassifiziert.

6.3.1 Geradeausflug

Um die Schätzbarkeit der Parameter der inneren Orientierung an einem möglichst einfachen und übersichtlichen Beispiel zu zeigen, wird ein Geradeausflug über ebenem Gelände simuliert. Es liegen Bildkoordinaten für 3 Sensoren vor. In einer simultanen Ausgleichung werden von den Parametern der inneren Orientierung nur die Parameter x_0 und y_0 des Nadirsensors geschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass y_0 für einen Sensor signifikant schätzbar ist, während x_0 für den Nadirsensor nicht signifikant geschätzt werden kann. Erklärbar ist die Nichtschätzbarkeit des x_0 durch die hohe Korrelation, die zwischen dem Parameter x_0 und den Parametern φ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten m bestehen, denn beide haben eine ähnliche Wirkung im Objektraum. Wird anstatt des Nadirsensors ein Stereosensor mitgeschätzt, ergibt sich kein anderes Ergebnis, d.h. auch hier ist y_0 schätzbar, während x_0 und φ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten nicht signifikant schätzbar sind. Wird φ_m in der Ausgleichung nicht mitgeschätzt, lässt sich x_0 entweder für den Nadirsensor oder eine der Stereosensoren signifikant schätzen.

Werden in zwei Sensoren jeweils die Parameter y_0 geschätzt, sind diese nicht mehr signifikant schätzbar. Erklären lässt sich dies dadurch, dass in diesem Fall zwischen den Parametern κ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten und den beiden zu schätzenden Parametern y_0 Korrelationen auftreten. Werden die Parameter κ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten nicht mitgeschätzt, lassen sich in zwei Sensoren die Parameter y_0 signifikant schätzen.

Werden die Parameter φ_m und κ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten in der Ausgleichung nicht mitgeschätzt, bestätigt das Ergebnis die bestehenden Korrelationen zwischen den

Parametern x_0 und φ_m sowie den Parametern y_0 und κ_m. In der Paxis müssen allerdings auf jeden Fall die Parameter φ_m und κ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten mitgeschätzt werden.

6.3.2 Gekrümmte Bahn

In der Mars Express Mission wird die HRSC gewöhnlich mehrere hundert Kilometer lang betrieben. Deshalb muss von einer gekrümmten Flugbahn ausgegangen werden, die nur für kurze Streifen näherungsweise als Geradeausflug angesehen werden kann. Es wird daher im Folgenden am Beispiel des 719 km langen Streifens h2063$_{0000}$ empirisch ermittelt, ob die für den Geradeausflug ermittelten Ergebnisse über die Schätzbarkeit bestimmter Parameter der inneren Orientierung auf eine gekrümmte Flugbahn übertragen werden können.

6.3.2.1 Bildkoordinaten aus 3 Sensoren

Zunächst werden wie im Geradeausflug nur die Bildkoordinaten von 3 Sensoren des Streifens h2063$_{0000}$ verwendet. Es werden wieder x_0 und y_0 des Nadirsensors simultan mit der äußeren Orientierung geschätzt. Wie beim Geradeausflug kann der Parameter y_0 signifikant geschätzt werden (Tabelle 6.1). Im Gegensatz zum Geradeausflug zeigt sich, dass x_0 in einer gekrümmten Bahn ebenfalls signifikant schätzbar ist.

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
ND	2,5	0,7	1,4	0,9

Tabelle 6.1. Verbesserungen und Standardabweichungen der Parameter der inneren Orientierung bei einer von 3 Sensoren

Während für die Schätzbarkeit des Parameters y_0 die gleichen Begründungen wie für den Geradeausflug gelten, tritt bei der Schätzung von x_0 im gekrümmten Orbit weitaus geringere Korrelation mit den Parametern φ_m auf.

Bei der Schätzung der Parameter in zwei Sensoren (siehe Tabelle 6.2) zeigt sich, dass σ_{x_0} und σ_{y_0} im Gegensatz zu den in Tabelle 6.1 gegebenen Werten stark ansteigen. Daraus ist abzuleiten, dass die Parameter der inneren Orientierung für zwei und mehr Sensoren nicht mehr schätzbar sind. Unerheblich ist hierbei, ob die Parameter in den Sensoren ND und S1, in den Sensoren ND und S2 oder in den Sensoren S1 und S2 geschätzt werden.

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
ND	-9,3	2,4	38,3	5,1
S1	23,9	4,7	71,6	9,9

Tabelle 6.2. Verbesserungen und Standardabweichungen der Parameter der inneren Orientierung bei 2 von 3 Sensoren

Die Parameter y_0 zweier Sensoren können aus den gleichen Gründen, die für den Geradeausflug gelten, nicht geschätzt werden. Werden, wie im Fall des Geradeausflugs, die Parameter κ_m der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten m in der Ausgleichung nicht mitgeschätzt, können die Parameter y_0 zweier Sensoren bestimmt werden. Dies bestätigt vorhandene Korrelationen zwischen den Parametern y_0 und κ_m an den Orientierungspunkten.

Für x_0 hingegen ergibt sich eine Korrelation zwischen den beiden Parametern der inneren Orientierung x_0. Werden die Parameter φ_m und κ_m nicht mitbestimmt, sind weiterhin die beiden Parameter x_0 nicht signifikant schätzbar. Bei der Untersuchung anderer Streifen ergeben sich andere theoretische Standardabweichungen der zu schätzenden Parameter der inneren Orientierung x_0 und y_0. Allerdings bleiben in allen Streifen jeweils nur für eine der drei Sensoren x_0 und y_0 schätzbar.

6.3.2.2 Bildkoordinaten aus 5 Sensoren

Da in einigen Streifen auch Bildkoordinaten aus 5 Sensoren in guter geometrischer Auflösung vorliegen, wird untersucht, inwieweit sich für diesen Fall die Parameter der inneren Orientierung bestimmen lassen. Als Beispiel dient hier wieder der Streifen h2063$_{0000}$. Verwendet werden die Bildkoordinaten aus fünf Sensoren. Die Ergebnisse (siehe Tabelle 6.3) der geschätzten Parameter der drei Sensoren zeigen, dass hier x_0 und y_0 für alle drei Sensoren signifikant schätzbar sind. Die Standardabweichungen können im Vergleich zu Tabelle 6.1 verbessert werden, da aufgrund der Nutzung von 5 Sensoren eine höhere Redundanz in der Ausgleichung vorliegt. Dies ist auf 40 % mehr Beobachtungen (Bildkoordinaten) und eine praktisch gleichbleibende Anzahl an Unbekannten zurückzuführen. Werden z.B. die Parameter der Sensoren P1 und P2 anstatt der Sensoren S1 und S2 geschätzt, führt dies zu anderen theoretischen Standardabweichungen. Allerdings können weiterhin die Parameter x_0 und y_0 von drei Sensoren geschätzt werden.

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
ND	0,3	0,2	1,5	0,3
S1	-5,9	0,2	0,9	0,4
S2	3,1	0,3	0,3	0,4

Tabelle 6.3. Verbesserungen und Standardabweichungen der Parameter der inneren Orientierung bei 3 von 5 Sensoren

Werden für vier Sensoren die Parameter der inneren Orientierung geschätzt, so sind die Parameter x_0 und y_0 nicht mehr ausreichend signifikant schätzbar (siehe Tabelle 6.4).

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
ND	-1,5	1,5	31,1	3,4
S1	-10,7	3,9	74,3	8,4
S2	4,0	0,8	-15,3	1,8
P1	-3,8	3,1	58,7	6,7

Tabelle 6.4. Verbesserungen und Standardabweichungen der Parameter der inneren Orientierung bei 4 von 5 Sensoren

Der x_0 Parameter des Sensors S2 kann signifikant geschätzt werden. Allerdings reicht es nicht aus, wenn sich nur einer der Parameter gut bestimmen lässt. Werden die Parameter x_0 und y_0 des Sensors P2 anstatt der Parameter x_0 und y_0 des Sensors P1 geschätzt, führt dies wiederum zu keinem anderen Ergebnis. Die Erklärung für die Schätzbarkeit oder Nichtschätzbarkeit ist analog zu Abschnitt 6.3.2.1 zu sehen.

6.3.2.3 Bildkoordinaten aus 9 Sensoren

Stehen in machen Fällen Bildkoordinaten aus 9 Sensoren zur Verfügung, so können analog zu den Fällen mit 3 bzw. 5 Sensoren hier die Parameter x_0 und y_0 von 7 Sensoren geschätzt werden. Daraus ergibt sich, dass bei vorhandenen n Sensoren immer nur für n - 2 Sensoren die Parameter x_0 und y_0 der inneren Orientierung verbessert werden können.

6.3.2.4 Auswirkungen von Fehlern nicht schätzbarer Parameter

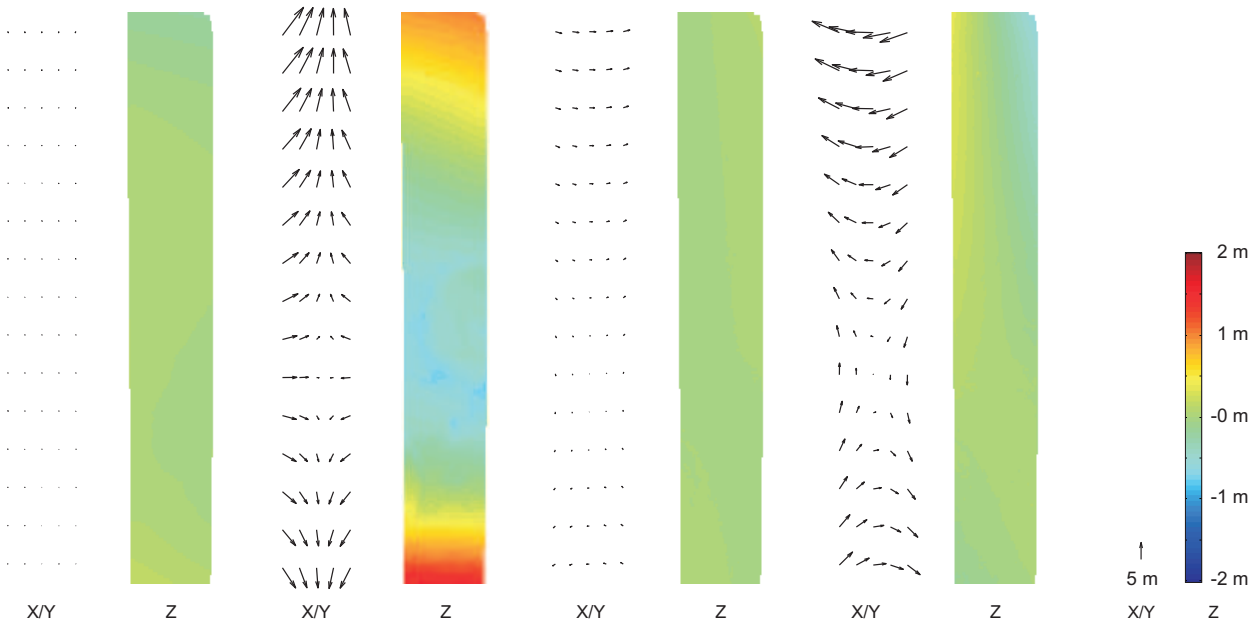
An dieser Stelle wird untersucht, inwieweit sich mögliche Fehler der inneren Orientierung der vier nicht schätzbaren Parameter (2 x x_0, 2 x y_0) der zwei Sensoren P1 und P2 auf die Koordinaten der Objektpunkte auswirken und inwieweit sich diese auch nicht durch die Parameter der äußeren Orientierung kompensieren lassen. Hierzu werden verschiedene Ausgleichungen mit Bildkoordinaten aus 5 Sensoren des Streifens h2063$_{0000}$ berechnet. Bei allen Ausgleichungen werden jeweils x_0 und y_0 der Sensoren ND, S1 und S2 geschätzt. Die Fälle unterscheiden sich ausschließlich durch die jeweils

eingeführten Werte x_0 und y_0 der inneren Orientierung für die Sensoren P1 und P2. Die Parameter der Sensoren P1 und P2 werden vor der Ausgleichung um die in Tabelle 6.5 aufgeführten Werte, d.h. um ein Pixel, geändert und in der Ausgleichung nicht mitgeschätzt. Für die Bewertung werden die Ergebnisse einer Ausgleichung als Referenz verwendet, in der vor der Ausgleichung keine Parameter geändert werden. Die äußere Orientierung wird in jedem der Fälle mitgeschätzt.

Fall	$P1_{\Delta x_0}$ [μm]	$P2_{\Delta x_0}$ [μm]	$P1_{\Delta y_0}$ [μm]	$P2_{\Delta y_0}$ [μm]
A	+7	+7	0	0
B	+7	−7	0	0
C	0	0	+7	+7
D	0	0	+7	−7

Tabelle 6.5. Änderung an den Parametern x_0 und y_0 der Sensoren P1 und P2

In der Bewertung werden jeweils die Objektpunktkoordinaten der verschiedenen Fälle mit den Objektpunktkoordinaten der Referenz verglichen. Die Differenzen der Objektpunktkoordinaten ergeben, dass sich für die Fälle A (siehe Abbildung 6.2(a)) und C (siehe Abbildung 6.2(c)) mögliche Fehler sowohl in der horizontalen Position als auch in der Höhe von der äußeren Orientierung fast vollständig kompensieren lassen, d.h. die geschätzten Parameter der äußeren Orientierung sind entsprechend „verfälscht“. Das Ergebnis ist nicht weiter verwunderlich, da durch die Änderung der beiden Sensoren um +7 μm nahezu identische Wirkungen in den Objektpunktkoordinaten erzielt werden, welche durch einen Bias in X und Y kompensiert werden können.



(a) Fall A (b) Fall B (c) Fall C (d) Fall D

Abbildung 6.2. Auswirkungen der Änderungen von x_0 und y_0 in den Sensoren P1 und P2 auf die Objektpunktkoordinaten

Die Fälle B (siehe Abbildung 6.2(b)) und D (siehe Abbildung 6.2(d)) zeigen, dass die Restdifferenzen zwischen den Objektpunktkoordinaten der Referenz und den Objektpunktkoordinaten des jeweiligen Falls größer sind, als für die Fälle A und C. Durch die Verschiebung der Sensoren in die entgegengesetzte Richtung wird im Fall B vor allem eine Wirkung in der Höhe erzielt. Das Ausmaß der Wirkung in den Objektpunktkoordinaten ist von der Flughöhe abhängig.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Auswirkungen der nicht schätzbaren Parameter in den Objektpunktkoordinaten nur im Bereich weniger Meter liegen, da die Änderungen von der äußeren Orientierung nahezu korrigiert werden können. Die verbleibenden Differenzen sind deshalb tolerierbar.

6.4 Schätzbarkeit der Parameter der inneren Orientierung mit DGM

In Abschnitt 6.3.2 wird gezeigt, dass bei Bildkoordinaten aus 3, 5 und 9 Sensoren die Parameter x_0 und y_0 der inneren Orientierung von 1, 3 und 7 Sensoren ausschließlich aus den Strahlenschnitten geschätzt werden können. In diesem Fall das MOLA DGM zusätzlich zu verwenden, ist nicht sinnvoll, da die Genauigkeit der Bildkoordinaten um ein vielfaches höher ist, als die Genauigkeit des MOLA DGMs. Deshalb wird ein Fall untersucht, bei dem eine Bestimmung der Parameter nicht mehr allein aus den Strahlenschnitten möglich ist. Dies tritt bei der Bestimmung der Parameter x_0 und y_0 bei 4 von 5 Sensoren auf (siehe Tabelle 6.4). Als zusätzliche Information wird das MOLA DGM eingeführt und jeweils wieder die Schätzbarkeit der zwei Parameter der inneren Orientierung für die Sensoren ND, S1, S2 und P2 untersucht.

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
ND	-2,5	1,4	27,1	3,1
S1	-13,9	3,5	63,5	7,7
S2	4,3	0,7	-13,4	1,6
P1	-6,1	2,8	50,3	6,1

Tabelle 6.6. Verbesserungen und Standardabweichungen der Parameter der inneren Orientierung bei 4 von 5 Sensoren mit MOLA DGM

Das Ergebnis zeigt (siehe Tabelle 6.6), dass die theoretischen Standardabweichungen im Vergleich zu den in Tabelle 6.4 gezeigten Werten besser werden. Trotzdem können die Genauigkeiten, die beim Schätzen der Parameter der 3 Sensoren (siehe Tabelle 6.3) erzielt werden, bei weitem nicht erreicht werden. Somit zeigt diese Untersuchung, dass das MOLA DGM nicht wesentlich zur Verbesserung der Parameter der inneren Orientierung beitragen kann.

6.5 Bestimmung eines verbesserten Parametersatzes der inneren Orientierung für 5 Sensoren

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2.3 erwähnt, wirken nur während des Starts des Raumschiffs große Kräfte auf die Kamera. Es kann deshalb angenommen werden, dass sich die innere Orientierung im Marsorbit nicht mehr ändert. Daher können für die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung die Daten zahlreicher Streifen verwendet werden, welche die folgenden Merkmale aufweisen:

- Aus geringer Flughöhe aufgenommene Bilder.
- Gute Qualität der Bilder, d.h. die Atmosphäre sollte nicht durch Sandstürme verunreinigt sein.
- Möglichst wenige Kompressionsartefakte, da diese zu fehlerhaften Bildzuordnungen führen können.
- Die Daten der Sensoren sollten mindestens im MPF 2 vorliegen, da es keine Streifen gibt, in welchen die Bilddaten für mehr als 3 Sensoren im MPF 1 vorliegen (siehe Abschnitt 5.1.1.3).

Im Zeitraum bis Oktober 2005 liegen nur für ca. 60 Streifen die Daten der Sensoren ND, S1 und S2 im MPF 1 oder MPF 2 sowie die Daten der Sensoren P1 und P2 im MPF 2 vor. Von diesen werden 46 Streifen ausgewählt, in denen gut verteilte, mit hoher Genauigkeit und in ausreichender Anzahl zugeordnete Bildkoordinaten bzw. Objektpunkte vorliegen. Die Objektpunktanzahl beträgt, je nach Streifen, zwischen ca. 4000 und ca. 58000 Objektpunkte. Die Bilddaten der multispektralen Sensoren BL, GR, RE und IR der 46 Streifen sind nur im MPF 4 vorhanden. Deshalb werden zunächst nur die Bildkoordinaten der 5 panchromatischen Sensoren genutzt.

Wie in Abschnitt 6.3.2 bereits gezeigt, können in Fällen mit 5 Sensoren nur sechs Parameter der inneren Orientierung (x_0 und y_0 in jeweils 3 Sensoren) signifikant geschätzt werden. Da in den überwiegenden

Fällen für die Bestimmung der äußeren Orientierung aufgrund des MPF (siehe Abschnitt 5.1.1.3) nur die Bilder der Sensoren ND, S1 und S2 für die Bildzuordnung dienen, werden die Parameter der inneren Orientierung dieser Sensoren bestimmt. Hierzu werden alle schätzbaren Parameter praktisch als freie Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt, d.h. die Beobachtungen erhalten ein sehr niedriges Gewicht.

Die einzelnen Verbesserungen der Parameter der inneren Orientierung Δx_0 für die drei x_0-Parameter sind für alle Streifen in Abbildung 6.3 dargestellt. Abbildung 6.4 zeigt die einzelnen Verbesserungen Δy_0 für die drei y_0-Parameter ebenfalls für alle Streifen. Die theoretischen Standardabweichungen σ_{x_0} bzw. σ_{y_0} liegen bei maximal 0,7 μm und sinken mit steigender Anzahl von Objektpunkten. Ebenfalls zeigt sich in den beiden Abbildungen, dass sich die Verbesserungen der Parameter der inneren Orientierung in einem relativ schmalen Bereich bewegen.

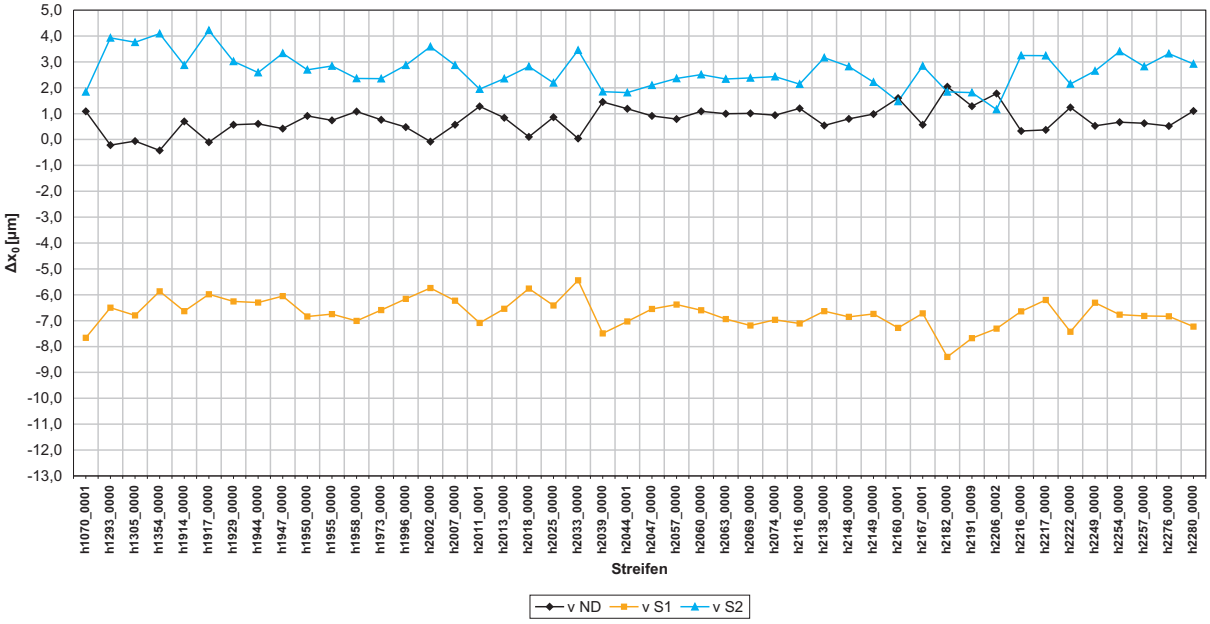


Abbildung 6.3. Verbesserungen der Parameter x_0 der inneren Orientierung (Werte)

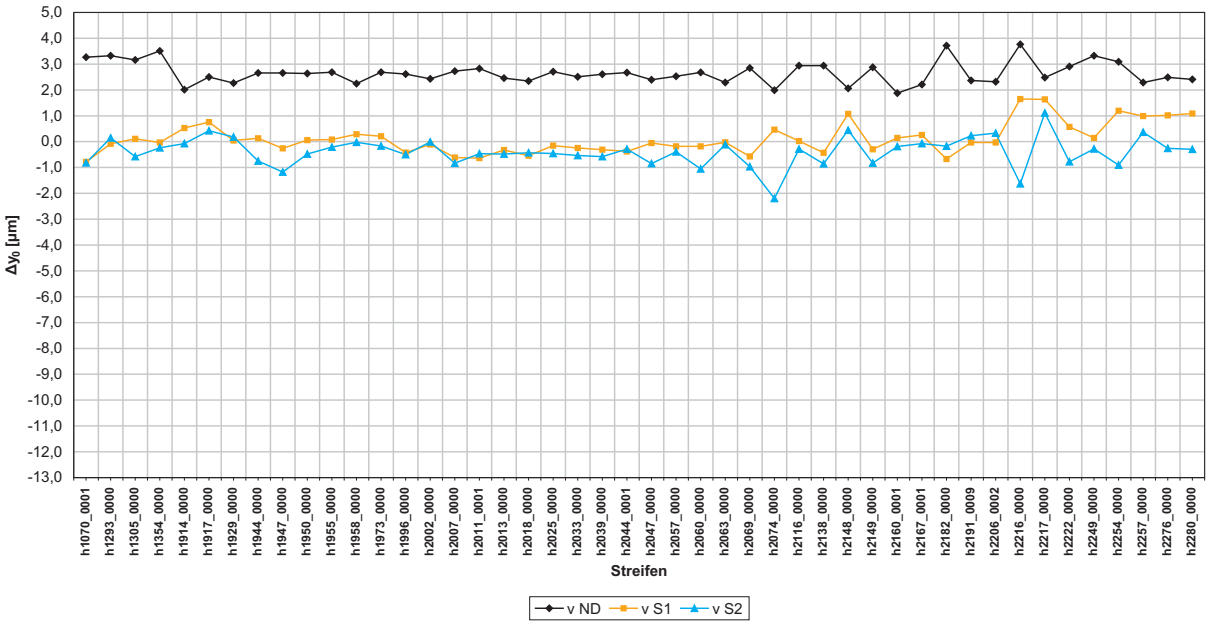


Abbildung 6.4. Verbesserungen der Parameter y_0 der inneren Orientierung (Werte)

Die zwei Mittelwerte der Parameter der inneren Orientierung pro Sensor werden aus den 46 Einzelergebnissen (Δx_0 und Δy_0) und deren theoretischen Standardabweichungen mittels gewichteter Mittelwertbildung gewonnen (siehe Tabelle 6.7). Die theoretischen Standardabweichungen der gewichteten Mittelwerte ergeben sich durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz. Die gewichtete Mittelwertbildung hat den Vorteil, dass Ergebnisse aus Streifen mit schlechterer theoretischer Standardabweichung σ_{x_0} bzw. σ_{y_0} kein großes Gewicht bei der Mittelwertbildung haben. Die Tabelle zeigt außerdem, dass fast alle Verbesserungen signifikant geschätzt werden. Nur y_0 des Sensors S1 ist nicht signifikant schätzbar. Deshalb kann dieser Wert in den folgenden Betrachtungen weggelassen werden. Die verbesserten Parameter der inneren Orientierung werden schließlich aus den Verbesserungen und den eingeführten Näherungswerten berechnet.

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
ND	0,8	0,1	2,7	0,1
S1	-6,7	0,1	-0,1	0,1
S2	2,3	0,1	-0,5	0,1

Tabelle 6.7. Gewichtete Mittelwerte der Verbesserungen und theoretische Standardabweichungen

Des Weiteren wurde untersucht, inwiefern durch eine erneute Schätzung der Parameter der inneren Orientierung mit dem nunmehr verbesserten Parametersatz der inneren Orientierung als Eingangsdatensatz in die Bündelausgleichung eine erneute Schätzbarkeit dieser Parameter möglich ist.

Die Verbesserungen für die einzelnen Werte liegen in nahezu allen Fällen unter 1 μm und meist deutlich darunter. Schätzbar sind diese Einzelwerte mit einer theoretischen Standardabweichung von 0,2 bis 0,6 μm. Daraus ergibt sich, dass die Vorgehensweise nicht zu einer weiteren signifikanten Verbesserung der Parameter der inneren Orientierung führt. Für die weiteren Untersuchungen werden daher die bereits in Tabelle 6.7 angegebenen Mittelwerte der Verbesserungen der Parameter der inneren Orientierung genutzt.

6.6 Restfehler mit verbessertem Parametersatz

Der verbesserte Parametersatz der inneren Orientierung dient in diesem Abschnitt als Eingangsdatensatz in Bündelausgleichungen wie sie in Kapitel 5 gezeigt wurden, d.h. die innere Orientierung wird als konstant eingeführt und nur die äußere Orientierung geschätzt. Die Ergebnisse werden anhand der systematischen und zufälligen Restfehler in den Bildkoordinaten evaluiert. Des Weiteren tragen σ_0 a posteriori, die theoretischen Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten und die Differenz zwischen HRSC Objektpunkten und MOLA DGM zur Beurteilung der Ergebnisse bei.

6.6.1 Bildkoordinaten aus 5 Sensoren

Nach Einführung des verbesserten Parametersatzes in die Ausgleichung sinken die systematischen Restfehler in den Bildkoordinaten von durchschnittlich 1,2 μm auf 0,2 μm in x und von 0,7 μm auf 0,4 μm in y. Um die systematischen Restfehler zu berechnen, werden die Verbesserungen aller Sensoren an den Bildkoordinaten zuerst wieder in 8 Kacheln unterteilt und für jede Kachel der quadratische Mittelwert berechnet (siehe Abschnitt 5.2.2.4). Anschließend wird der Mittelwert aus den Ergebnissen der 8 Kacheln berechnet. Dieser systematische Restfehler wird sowohl für x als auch für y bestimmt.

Abbildung 6.5 zeigt die nach einer Ausgleichung mit dem verbesserten Parametersatz verbleibenden Restfehler für den zu Beginn des Kapitels gezeigten Streifen h2063$_{0000}$. Im Vergleich zu Abbildung 6.1 verringern sich die systematischen Restfehler erheblich. Auch in den Sensoren P1 und P2, in denen die Parameter der inneren Orientierung nicht verbessert wurden, gehen die systematischen Restfehler der Bildkoordinaten stark zurück. Allerdings bleiben bei einigen der untersuchten Streifen weiterhin kleine systematische Restfehler erkennbar.

Abbildung 6.5. Mittlere Restabweichungen in den Bildkoordinaten nach der Ausgleichung der Sensoren ND, S1, S2, P1 und P2 mit verbesserten Parametern der inneren Orientierung für die Sensoren ND, S1 und S2

Der quadratische Mittelwert der Verbesserungen der Bildkoordinaten aller Sensoren zeigt die Summe der systematischen und zufälligen Restabweichungen in den Bildkoordinaten. Sie verbessern sich geringfügig von durchschnittlich 3,1 μm auf 2,7 μm in x und von 3,5 μm auf 3,3 μm in y (siehe Abbildungen 6.6 und 6.7). Ausschlaggebend für die relativ geringe Verbesserung der Restabweichung unter Verwendung des verbesserten Parametersatzes ist, dass die Verbesserung der inneren Orientierung nur die systematischen Anteile verringert. Die zufälligen Fehler werden durch eine Verbesserung der inneren Orientierung nicht verringert.

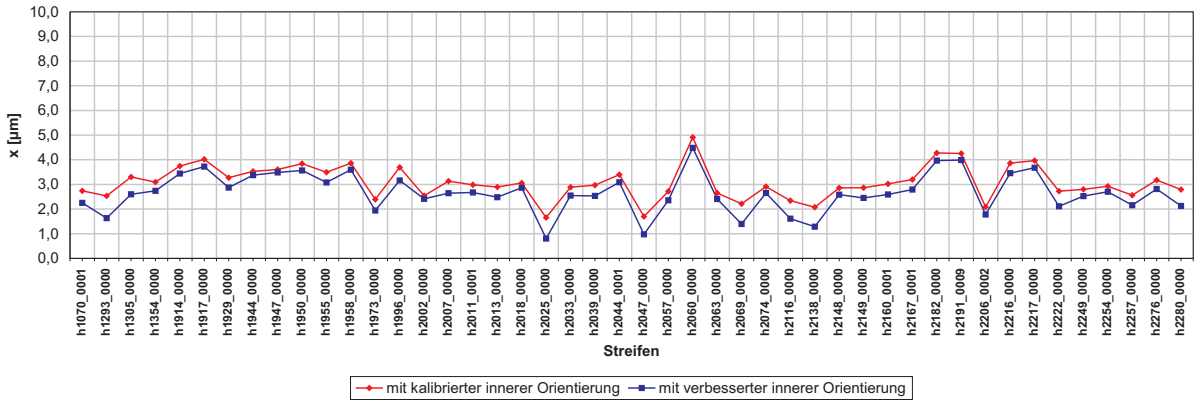


Abbildung 6.6. Systematische und zufällige Restabweichungen in den Bildkoordinaten in x

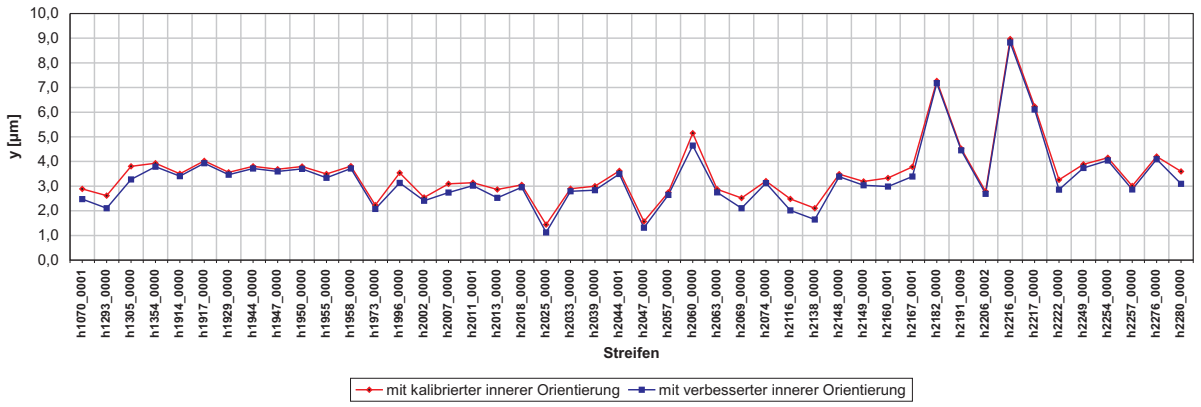


Abbildung 6.7. Systematische und zufällige Restabweichungen in den Bildkoordinaten in y

Ein ähnliches Bild zeigt σ_0 a posteriori. Es ergeben sich hier Verbesserungen von durchschnittlich 10 Prozent (siehe Abbildung 6.8). Abhängig sind diese Verbesserungen von der Anzahl der verwendeten Bildkoordinaten bzw. der daraus resultierenden Redundanz in der Ausgleichung. Die Redundanz kann in einigen Fällen zwischen der Ausgleichung mit nicht verbessertem und der Ausgleichung mit verbessertem Parametersatz unterschiedlich ausfallen, da die Detektion von groben Fehlern in den verschiedenen Fällen jeweils ein geringfügig anderes Ergebnis liefert (siehe Abschnitt 5.2.1.1).

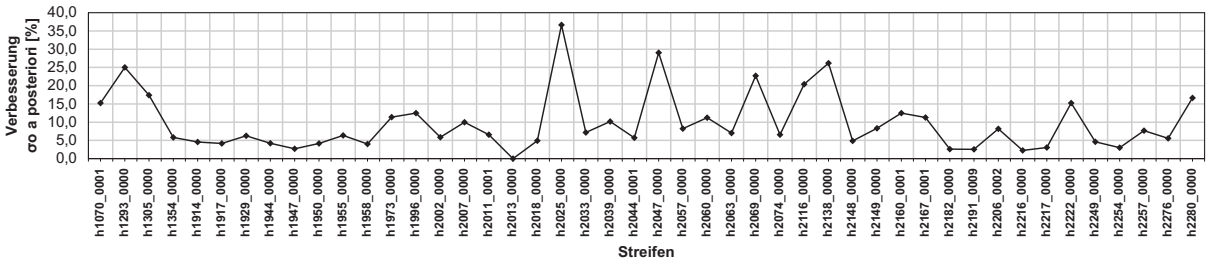
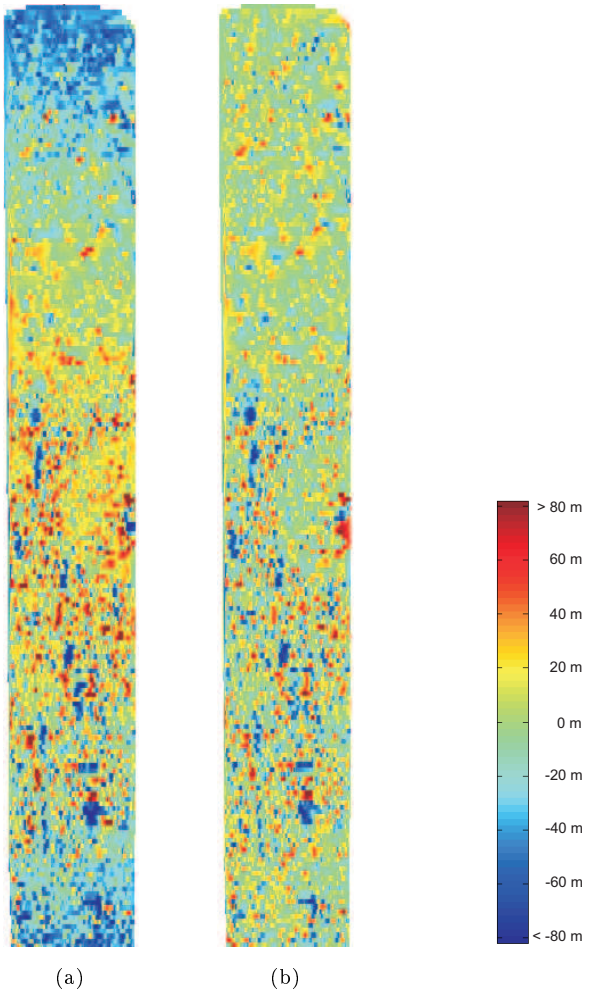


Abbildung 6.8. Verbesserungen von σ_0 a posteriori

Die theoretischen Standardabweichungen der Objektpunkte liegen für die aufgezeigten Streifen in der horizontalen Position im Bereich von 3 - 12 m und in der Höhe im Bereich von 9 - 39 m. Auch hier wird eine Verbesserung um durchschnittlich 10 Prozent erreicht, da sich die theoretischen Standardabweichungen direkt aus σ_0 a posteriori ableiten lassen.



(a) (b)

Abbildung 6.9. Differenz in Metern zum MOLA DGM ohne und mit verbessertem Parametersatz der inneren Orientierung

Für den Streifen h2063$_{0000}$ zeigt Abbildung 6.9 die Differenzen zwischen dem MOLA DGM und den HRSC Objektpunkten. Es ergeben sich besonders am Beginn und am Ende des Streifens bei der Ausgleichung mit dem nicht verbesserten Parametersatz der inneren Orientierung größere Differenzen zum MOLA DGM (siehe Abbildung 6.9(a)). Der quadratische Mittelwert aller Differenzen beträgt vor der Ausgleichung 38 m. Nach der Ausgleichung mit verbessertem Parametersatz sind die Differenzen geringer und gleichmäßiger verteilt (siehe Abbildung 6.9(b)). Der quadratische Mittelwert aller Differenzen sinkt um 16 Prozent auf 32 m.

Auch in anderen Streifen sind ähnlich große Verbesserungen sichtbar. Die Vergleiche mit dem MOLA DGM zeigen, dass durch die Nutzung eines für alle Streifen gültigen verbesserten Parametersatzes für die innere Orientierung bessere Ergebnisse erzielt werden, obwohl die durchschnittliche Verbesserung der Bildkoordinaten, des σ_0 a posteriori und der Objektpunktkoordinaten nur eine Verbesserung um durchschnittlich 10 Prozent beträgt. In keinem Streifen werden die Differenzen zwischen den HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM größer. Lediglich in Fällen, in denen die Differenzen bereits ohne verbesserte innere Orientierung sehr klein sind, ist keine Verbesserung der Ergebnisse für die Streifen möglich.

6.6.2 Bildkoordinaten aus 3 Sensoren

Auch eine Anwendung des neuen Parametersatzes auf Streifen, für die nur Bildzuordnungsergebnisse der Sensoren ND, S1 und S2 vorliegen, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Beispielen, in denen Ergebnisse aus 5 Sensoren vorliegen. Die systematischen Restfehler der Bildkoordinaten gehen stark zurück und liegen nach der Ausgleichung meist unter 0,5 μm. Auch σ_0 a posteriori und die theoretischen Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten zeigen vergleichbare Ergebnisse wie bei 5 Sensoren. Ebenfalls werden die Differenzen zwischen dem MOLA DGM und den HRSC Objektpunkten geringer.

6.7 Verbesserung der Parameter der inneren Orientierung für die multispektralen Sensoren

Von 17 Streifen liegen Bilder vor, in denen zusätzlich zu den panchromatischen Sensoren auch die multispektralen Sensoren (BL, GR, RE, IR) in noch brauchbaren Auflösungen, d.h. mit MPF 4 betrieben wurden. Ein Blick auf die verbleibenden Restfehler in den Bildkoordinaten nach einer Ausgleichung unter Nutzung der verbesserten inneren Orientierung für die panchromatischen Sensoren ND, S1 und S2 zeigt in Streifen h2063$_{0000}$, dass in den multispektralen Sensoren größere systematische Restfehler in den Bildkoordinaten verbleiben (siehe Abbildung 6.10).

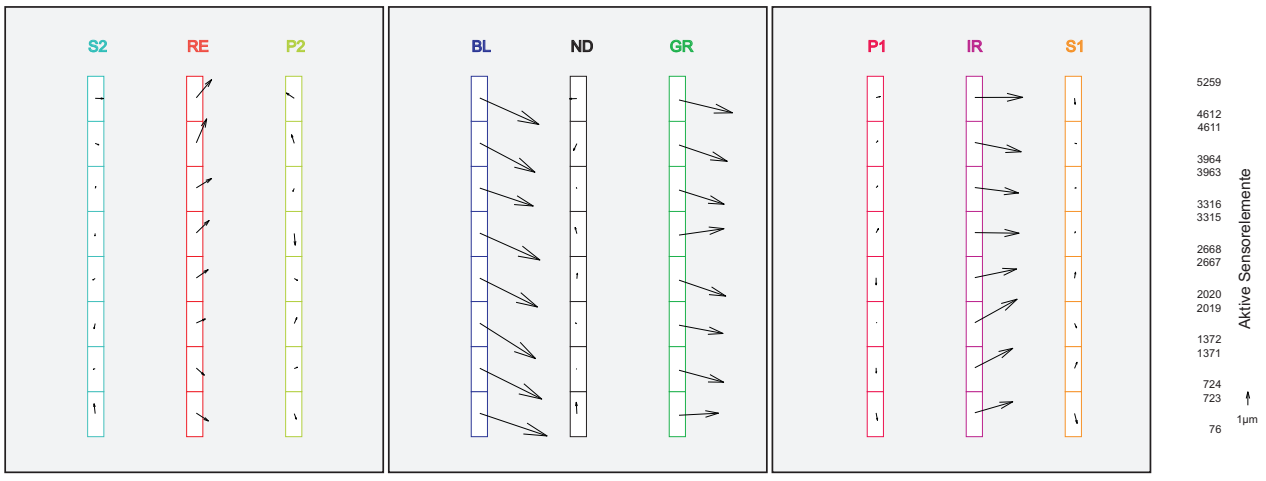
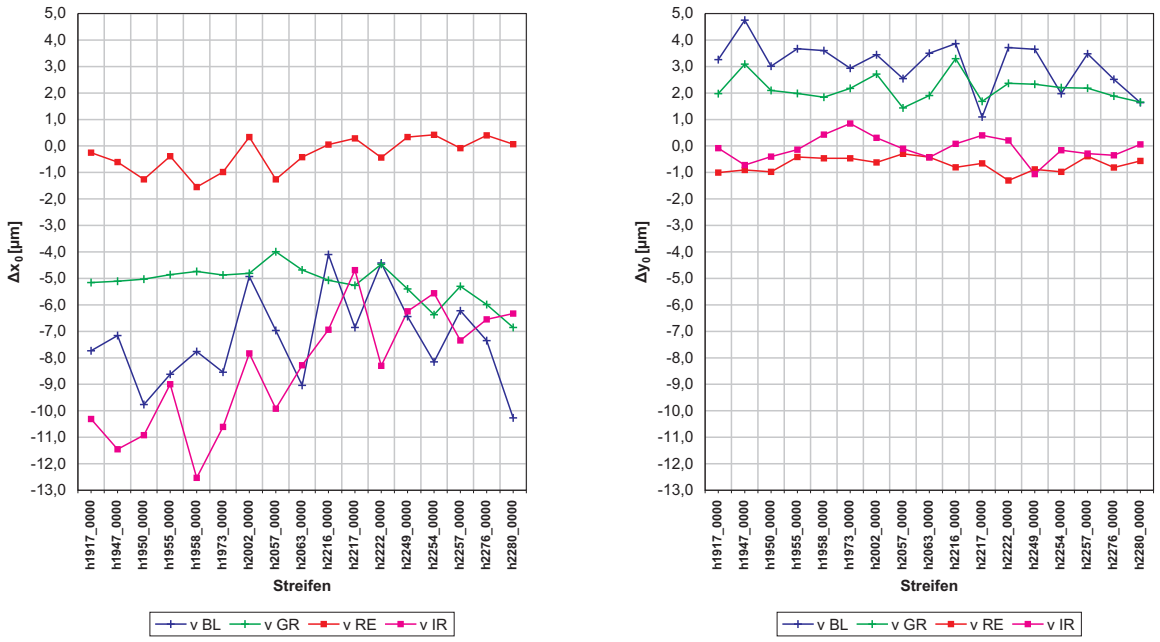


Abbildung 6.10. Mittlere Restabweichungen in den Bildkoordinaten nach der Ausgleichung aller Sensoren mit verbesserten Parametern der inneren Orientierung für die Sensoren ND, S1 und S2

Analog zu Abschnitt 6.5 werden die Parameter x_0 und y_0 der inneren Orientierung für die vier multispektralen Sensoren geschätzt. Die Parameter der anderen Sensoren ND, S1, S2, P1 und P2 werden nicht mitgeschätzt, da die bereits gut bestimmten Parameter der inneren Orientierung dieser Sensoren durch die Farbsensoren negativ beeinflusst werden könnten. Abbildung 6.11(a) und 6.11(b) zeigen die Verbesserungen für die multispektralen Sensoren aller 17 Streifen. Für die Farbsensoren ergeben sich mitunter erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Streifen. Besonders die Sensoren BL und IR weisen in x_0 eine große Schwankungsbreite auf.



(a) Δx_0 (b) Δy_0

Abbildung 6.11. Verbesserungen der inneren Orientierung - Multispektralkanäle

Der gewichtete Mittelwert wird für jeden Sensor unter Berücksichtigung der Genauigkeiten nur für die vier Farbkanäle gewonnen (siehe Tabelle 6.8). Es zeigt sich, dass trotz der großen Unterschiede zwischen den Streifen die meisten Werte signifikant schätzbar sind. Lediglich die Verbesserung für y_0 des Sensors IR ist nur schwach signifikant schätzbar, obwohl σ_{y_0} des Sensors IR im üblichen Rahmen liegt (vergl. BL, GR, RE). Dies liegt vor allem daran, dass für y_0 des Sensors IR bereits ein guter Näherungswert in die Ausgleichung eingeführt wird.

Sensor	Δx_0 [μm]	σ_{x_0} [μm]	Δy_0 [μm]	σ_{y_0} [μm]
BL	-7,7	0,4	3,1	0,2
GR	-4,8	0,2	2,0	0,1
RE	-0,8	0,1	-0,6	0,1
IR	-9,5	0,4	0,2	0,1

Tabelle 6.8. Gewichtete Mittelwerte und theoretische Standardabweichungen für BL, GR, RE, IR

Wird der verbesserte Parametersatz der inneren Orientierung für die multispektralen Sensoren in der Bündelausgleichung verwendet, in der die Parameter der inneren Orientierung nicht geschätzt werden, so zeigt sich, dass für die 17 untersuchten Streifen die systematischen Restfehler der Bildkoordinaten in x von durchschnittlich 2,4 μm vor der Nutzung des verbesserten Parametersatzes für die innere Orientierung auf 0,7 μm unter Nutzung des verbesserten Parametersatzes sinken. Auch in y zeigt sich eine, wenn auch geringe Verbesserung mit 0,9 μm vor der Nutzung des verbesserten Parametersatzes und 0,7 μm unter Nutzung des verbesserten Parametersatzes.

Abbildung 6.12 zeigt wieder den Streifen h2063$_{0000}$ als Beispiel. Die systematischen Restfehler verringern sich. Allerdings sind nach der Ausgleichung immer noch kleine systematische Restfehler in den Bildkoordinaten der Sensoren BL, GR, RE und IR sichtbar. Da die Restfehler der Bildkoordinaten von Streifen zu Streifen unterschiedlich sind, können diese nicht von einer gemeinsamen, für alle Streifen geltenden, verbesserten inneren Orientierung abgefangen werden. Möglich ist es, die Parameter der inneren Orientierung für die farbigen Sensoren für jeden einzelnen Streifen simultan mit den Parametern der äußeren Orientierung zu schätzen. Sinnvoll ist dieses Vorgehen jedoch nicht, aufgrund der im Regelfall schlechten geometrischen Auflösung der farbigen Sensoren.

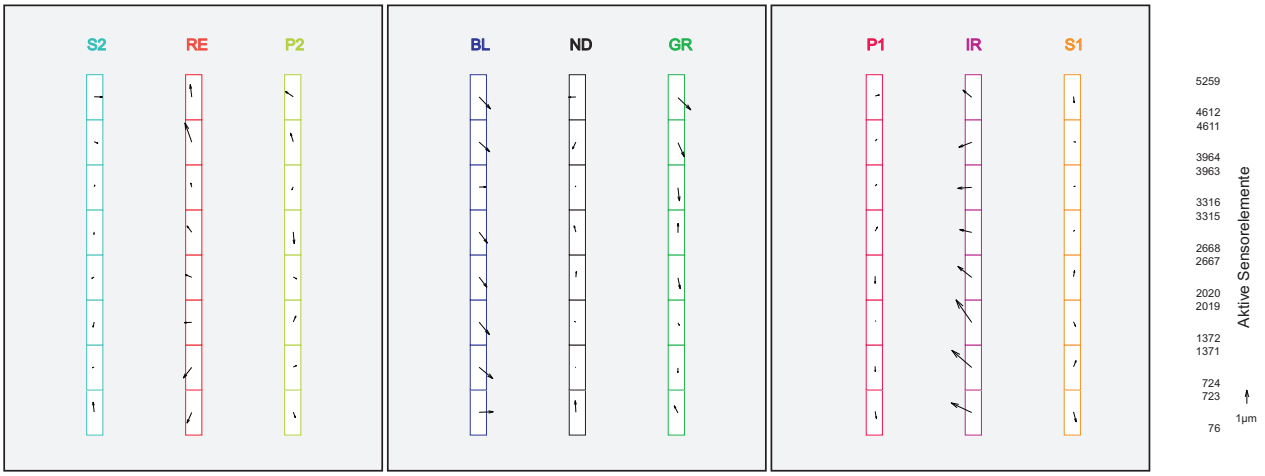


Abbildung 6.12. Mittlere Restabweichungen in den Bildkoordinaten nach der Ausgleichung aller Sensoren mit verbesserten Parametern der inneren Orientierung für die Sensoren ND, S1, S2, BL, GR, RE, IR

Die Summe der systematischen und zufälligen Restabweichungen in den Bildkoordinaten verringert sich von durchschnittlich 5,8 μm auf 5,2 μm in x und von 6,2 μm auf 5,9 μm in y. Da wiederum nur die systematischen Anteile und nicht die zufälligen Fehler verbessert werden, fällt die Verbesserung, wie in Abschnitt 6.6 gezeigt, ebenfalls gering aus. Bedingt durch die im MPF 4 gegebenen Farbkanäle sind allerdings die absoluten Werte, im Gegensatz zu denen im Abschnitt 6.6 gezeigten, größer. Die Genauigkeitswerte σ_0 a posteriori sinken ebenfalls um durchschnittlich 7 Prozent.

7. Ergebnisse und Ausblick

Das vorliegende Verfahren ermöglicht es, die äußere Orientierung der HRSC zu bestimmen, die seit Anfang 2004 den Roten Planeten umkreist. Da am Mars nur Passpunkte mit begrenzter Genauigkeit vorhanden sind, wurde hierfür das bereits vorhandene MOLA DGM als Passinformation verwendet. Ebenfalls war es mit dem Verfahren möglich, die innere Orientierung der Kamera simultan mit der äußeren Orientierung zu schätzen.

Grundlage für diese Arbeit ist das Prinzip der photogrammetrischen Punktbestimmung einer Dreizeilenkamera. Ausgangspunkt für das entwickelte Verfahren waren Arbeiten, die sich mit flugzeuggestützten oder im Erdorbit eingesetzten Dreizeilenkameras beschäftigen. Das funktionale Modell der Kleinste-Quadrate-Ausgleichung wurde aus den erweiterten Kollinearitätsgleichungen gebildet, die die Beziehung zwischen Objekt- und Bildraum herstellen. Zusätzlich wurde pro Objektpunkt eine Beobachtungsgleichung angesetzt, die den Zusammenhang zwischen Objektpunktkoordinaten und dem MOLA DGM beschreibt.

Neuartig an diesem Ansatz ist die kombinierte Ausgleichung von HRSC Zeilenbildern unter Verwendung des MOLA DGMs als Passinformation. Durch die speziellen Anforderungen bei der Mars Express Mission ist bei der Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung eine Trennung von Bahnparametern und Lagewinkeln erforderlich. So werden die Bahnparameter X, Y und Z nur jeweils mittels eines Bias und einer linearen Drift geschätzt, während die Lagewinkel φ, ω und κ jeweils an einer Vielzahl von Orientierungspunkten geschätzt werden. Notwendig ist diese Trennung, da einerseits eine Satellitenbahn relativ glatt verläuft und es daher sinnvoll ist, diese nur mittels Bias und linearer Drift zu modellieren. Andererseits sind nur die nominellen und nicht die tatsächlich am Orbiter eingestellten Lagewinkel bekannt. Deswegen mussten, je nach Anzahl und Verteilung der vorhandenen Bildkoordinaten, die Lagewinkel an mehreren Orientierungspunkten pro Streifen geschätzt werden.

7.1 Ergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte und Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und diskutiert. Es wird außerdem dargestellt, dass das entwickelte Ausgleichungsverfahren auf eine Vielzahl Streifen anwendbar ist und die innere Orientierung der HRSC simultan mit der äußeren Orientierung geschätzt werden kann.

Datenquellen: Als Datenquellen wurden die Daten der Mars Express Mission (HRSC Bilddaten, gemessene äußere Orientierung, Laborkalibrierung der inneren Orientierung) und das MOLA DGM der MGS Mission verwendet. Zunächst mussten mittels eines Bildzuordnungsprogramms Bildkoordinaten in den HRSC Bildern zugeordnet werden. Die Eigenschaften und Genauigkeiten der zur Verfügung stehenden Datensätze wurden anschließend untersucht, um das stochastische Modell richtig aufbauen zu können. Hierbei zeigte sich, dass gewöhnlich nur die Daten der panchromatischen Sensoren verwendet werden konnten, da die Bilddaten der multispektralen Sensoren meist nur in geringer geometrischer Auflösung vorhanden sind.

Einzelstreifen: Mit dem entwickelten Ausgleichungsmodell ist eine große Anzahl an Parametern der äußeren Orientierung schätzbar. Allerdings war es nicht immer sinnvoll alle Parameter zu schätzen. Deshalb wurden die Ergebnisse verschiedener Modellvarianten auf die signifikante Schätzbarkeit einzelner Parameter hin untersucht und daraus eine Modellvariante abgeleitet. Diese wurde mit den Daten von 12 Streifen eingehend untersucht und konnte schließlich als optimal angesehen werden. Es war außerdem notwendig, die Anzahl der Orientierungspunkte individuell für jeden Streifen festzulegen, da diese von der Menge und der Verteilung der beobachteten Bildkoordinaten abhängig ist. Die Wahl des Abstands zwischen den Orientierungspunkten ging hierbei vollautomatisch vonstatten. Ebenso wurden grobe Fehler vollautomatisch entfernt. Auch die Anpassung an das MOLA DGM konnte erfolgreich vorgenommen werden.

Mit dieser für Einzelstreifen entwickelten Modellvariante und der vollautomatischen Festlegung bestimmter Parameter individuell pro Streifen wurde die äußere Orientierung vieler Streifen ausgeglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass 988 der 1200 Einzelstreifen erfolgreich ausgeglichen wurden. Für die Einzelstreifen konnte die Differenz zwischen HRSC Objektpunkten und dem MOLA DGM nach der Ausgleichung vermindert werden, wodurch eine hohe Konsistenz zum MOLA DGM erreicht wurde. Einige Streifen konnten nicht erfolgreich ausgeglichen werden. Die Ursachen für eine nicht erfolgreiche Ausgleichung liegen meist in den Bilddaten selbst, wenn z.B. die Bilder geringe Texturen aufweisen. In diesen Fällen stößt dieses Verfahren an seine, durchaus nachvollziehbaren, Grenzen.

Blöcke: Das Ausgleichungsverfahren für Einzelstreifen wurde erweitert, um nebeneinander liegende Einzelstreifen zu Blöcken zu verknüpfen. Die Ergebnisse des dargestellten Blocks zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, mit dem entwickelten Verfahren nicht nur Einzelstreifen, sondern auch Blöcke erfolgreich auszugleichen. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass eine solche Ausgleichung vor allem die horizontale Lage der Streifen verbessert. Die Höhe konnte alleine durch die Anpassung der Einzelstreifen an das MOLA DGM schon sehr gut bestimmt werden. Deshalb führte hier eine Ausgleichung im Block zu keinem wesentlich besseren Ergebnis. Die Anwendung des Auswertekonzepts auf weitere Blöcke gelang ebenfalls. Die Ergebnisse sind mit denen des näher untersuchten Blocks vergleichbar.

Simultane Schätzung der inneren und äußeren Orientierung: Die innere Orientierung ist ein wichtiger Baustein bei der photogrammetrischen Punktbestimmung. Aus diesem Grund wurde die durch eine Laborkalibrierung Anfang 1996 bestimmte innere Orientierung mit der Bündelausgleichung überprüft. Bei der Untersuchung der Bildkoordinaten ergaben sich systematische Restfehler in diesen nach der Ausgleichung. Deshalb wurde untersucht, welche in der Bündelausgleichung verwendeten Parameter der inneren Orientierung sich aus physikalischer Sicht geändert haben könnten und welche dieser Parameter simultan mit den Parametern der äußeren Orientierung geschätzt werden können. Hierbei ergab sich, dass nicht alle Parameter, die möglicherweise von einer Änderung betroffen sein könnten, schätzbar sind. Auch konnte das MOLA DGM für diesen Zweck aufgrund seiner zu geringen Genauigkeit nicht verwendet werden.

Für 46 ausgesuchte Streifen wurden die bestimmbaren Parameter der inneren Orientierung der Nadir- und Stereosensoren (ND, S1, S2) unabhängig voneinander geschätzt. Hierfür wurden Bildkoordinaten aus 5 Sensoren genutzt. Aus den einzelnen Ergebnissen wurde anschließend ein einziger neuer Parametersatz der inneren Orientierung durch gewichtete Mittelwertbildung für die panchromatischen Sensoren gewonnen. In diesem Fall sind fast alle geschätzten Parameter signifikant schätzbar. Durch die Einführung des neuen Parametersatzes für die innere Orientierung können die systematischen Fehler in den Bildkoordinaten vermindert werden. Ebenso verbessern sich die durch die Bildkoordinaten gebildeten Objektpunkte um durchschnittlich 10 Prozent bei nahezu allen Streifen. Daher sollten die verbesserten Parameter der inneren Orientierung auf jeden Fall bei der Generierung von DGMs und Orthophotos verwendet werden, um die Qualität dieser Ergebnisse zu verbessern.

Schließlich wurde auch die innere Orientierung der multispektralen Sensoren bestimmt. Die Parameter dieser Sensoren lassen sich allerdings nicht ganz so gut bestimmen wie die Parameter der Nadir- und Stereosensoren, da die Daten dieser Sensoren eine zu geringe geometrische Auflösung besitzen und zudem die Empfindlichkeit dieser Sensoren wesentlich geringer ist, als die der panchromatischen Sensoren. Außerdem waren für diese Untersuchung nur die Daten von 17 Streifen geeignet. Es erschien daher sinnvoll, die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung der panchromatischen Sensoren unabhängig von den multispektralen Sensoren vorzunehmen. Werden zusätzlich noch die Bilder der multispektralen Sensoren genutzt, um farbige Orthophotos und Karten zu generieren, so ist es ebenfalls notwendig, die Verbesserungen der Parameter der inneren Orientierung der multispektralen Sensoren zu verwenden.

Schlussfolgerung: Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem in der Arbeit vorgestellten Bündelausgleichungsverfahren ein Werkzeug zur Hand ist, mit dem sowohl sehr gute Ergebnisse bei der Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung der HRSC für Einzelstreifen und Blöcke als

auch bei der gemeinsamen Schätzung der Parameter der inneren Orientierung mit den Parametern der äußeren Orientierung erzielt werden konnten.

7.2 Ausblick

Zum jetzigen Zeitpunkt (April 2007) ist die Sonde in gutem Zustand. Daher werden immer noch täglich neue HRSC Bildstreifen aufgenommen und zur Erde übertragen. Mit diesen können immer mehr lokale Blöcke in größerem Stil ausgeglichen werden. Ebenso ist es mit dem vorgestellten Ansatz möglich, regionale Blöcke auszugleichen. Soll der gesamte Mars in einem einzigen Block ausgeglichen werden, so müsste das Verfahren geändert werden, da es derzeit nur in einem lokalen Koordinatensystem arbeitet. Aber schon bei der Ausgleichung von regionalen Blöcken könnten lange Rechenzeiten Probleme bereiten, da diese durch die zunehmende Anzahl von Beobachtungen und Unbekannten steigen.

Mit dem vorgestellten Ansatz werden sehr gute Ergebnisse bei der Ausgleichung der Einzelstreifen erzielt. Deshalb werden bei der Verwendung anderer Ausgleichungmodelle keine großen Verbesserungen der Ergebnisse erwartet. Ein mögliches anderes Ausgleichungsmodell würde anstatt des MOLA DGMs die nicht interpolierten original MOLA Spurpunkte mittels Bedingungsgleichungen in die Ausgleichung einführen.

Bei der Schätzung der Parameter der inneren Orientierung wären als weiterführende Arbeiten Auswertungen von Block- oder sogar Kreuzbefliegungen anstatt der Einzelstreifen möglich. Dies erfordert aber dementsprechende Daten und geeignete Bildzuordnungsprogramme. Ein solches Bildzuordnungsprogramm wird derzeit am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität Hannover entwickelt und wird in Kürze in vollem Umfang zur Verfügung stehen (Schmidt, 2007). Bei der Verbesserung der inneren Orientierung der multispektralen Sensoren kann eine größere Anzahl an Streifen Abhilfe schaffen, um die Möglichkeiten bei der Verbesserung dieser Sensoren zu erhöhen. Ebenfalls wäre zu untersuchen, ob Effekte, die durch thermische Einflüsse ausgelöst werden, in den Parametern der inneren Orientierung sichtbar sind und eventuell modelliert werden können.

Ob die Streifen, bei denen eine erfolgreiche Verbesserung der Parameter der äußeren Orientierung im Moment aus unterschiedlichsten Gründen nicht möglich ist, infolge etwaiger Weiterentwicklung des Verfahrens erfolgreich ausgeglichen werden können, bleibt fraglich.

Grundsätzlich können mit dem Verfahren auch Daten anderer Dreizeilenkameras ausgeglichen werden. Hierzu muss nur die innere Orientierung der jeweiligen Kamera in das in diesem Ansatz verwendete Modell umgesetzt werden. Betreffen könnte dies Dreizeilenkameras, die sowohl bei interplanetaren Missionen als auch in der Erdbeobachtung, von Satelliten oder Flugzeugen aus, eingesetzt werden. Aufgrund vorhandener GPS/INS Systeme in der Erdbeobachtung ist hier das Potential der Einpassung der aus Zeilenbildern gewonnenen Objektpunkte an ein DGM allerdings eher geringer.

Verzeichnis der Variablen und Abkürzungen

ADS40	Airborne Digital Sensor
BL	Sensor Blau
CCD	Charge Coupled Device
DASA	Deutsche Aerospace AG
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DPA	Digitale Photogrammetrie-Ausstattung
DSN	Deep Space Network
ESA	European Space Agency
ESOC	European Space Operation Centre
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
FBM	Feature Based Matching
GPS	Global Positioning System
GR	Sensor Grün
GSFC	Goddard Space Flight Center
HRSC	High Resolution Stereo Camera
INS	Inertiales Navigationssystem
IR	Sensor Infrarot
ISRO	Indian Space Research Organization
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MGS	Mars Global Surveyor
MEGDR	Mission Experiment Gridded Data Record
MEOSS	Monocular Electro-Optical Stereo Scanner
MEX	Mars Express
MILSM	Multi Image Least Squares Matching
MOC	Mars Orbiter Camera
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter
MOMS	Modular Optoelectronic Multispectral Stereo Scanner
MPF	Makropixelformat
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Sensor Nadir
OEEPE	Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques
P1, P2	photometrische Sensoren
PDS	Planetary Data System
PEDR	Precision Experiment Data Records
RE	Sensor Rot
RMS	Root Mean Square Error
S1, S2	Stereosensoren
SiAPD	Silikon Avalanche Photodiode
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRC	Super Resolution Channel
TIU	Zeit-Intervall-Einheit
TLS	Three-Line-Scanner
USGS	United States Geological Survey
WAOSS	Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner

Literaturverzeichnis

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

Ackermann, F., Bodechtel, J., Lanzl, F., Meissner, D. und Seige, P. (1989): MOMS-02 ein multispektrales Stereo Bildaufnahmesystem für die zweite deutsche Spacelab Mission D2, *Geo-Informations-Systeme*, Band (2) 3, 5–11.

Ahmed, N., Natarajan, T. und Rao, K. R. (1974): Discrete Cosine Transform, *IEEE Transactions on Computers*, Band C-23, 90–93.

Albertz, J., Scholten, F., Ebner, H., Heipke, C. und Neukum, G. (1993): Two Camera Experiments on the Mars 94/96 Missions, *Geo-Informations-Systeme*, Band (6) 4, 11–16.

Archinal, B. A., Lee, E., Kirk, R. L., Duxbury, T. C., Sucharski, R. M., Cook, D. A. und Barrett, J. M. (2004): A New Mars Digital Image Model (MDIM) 2.1 Control Network, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35 (B4), 863–868.

Astrium (2001): Mars Express – System Requirements Specification, *Technical Report MEX.MMT.TN.0519*, Astrium.

Balmino, G., Moynot, B. und Valles, N. (1982): Gravity Field Model of Mars in Spherical Harmonics up to Degree and Order eighteen, *Journal of Geophysical Research*, Band 87, 9735–9746.

Brand, R. und Heipke, C. (1998): A System for Automatic Aerial Triangulation, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32 (2), 27–32.

Briese, C., Pfeifer, N. und Dorninger, P. (2002): Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 34, 3A, 55–61.

Buckley, S. J., Mills, J. P. und Mitchel, H. L. (2004): Improving the Accuracy of Photogrammetric Absolute Orientation Using Surface Matching, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35 (B3), 30–35.

Caplinger, M. A. und Malin, M. (2001): The Mars Orbiter Camera Geodesy Campaign, *Journal of Geophysical Research*, Band 106(E10), 23,595–23,606.

Carsenty, U., Flohrer, J., Jobs, D., Matz, K.-D., Sebastian, I. und Wesemann, K. (1997): HRSC FM1 and FM2 Calibration Document (Final Report), *Technical Report TN-WM-5000 PE/007*, DLR Institut für Planetenerkundung, Berlin-Adlershof.

Chen, T., Shibasaki, R. und Murai, S. (2003): Development and Calibration of the Airborne Three-Line Scanner (TLS) Imaging System, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 69, No. 1, 71–78.

Chitprasert, B. und Rao, K. R. (1990): Discrete Cosine Transform Filtering, *Signal Processing*, Band 19, 233–245.

Davies, M. (1978): The Control Net of Mars: May 1977, *Journal of Geophysical Research*, Band 83, 2311–2312.

Dorninger, P., Jansa, J. und Briese, C. (2004): Visualization and Topographical Analysis of the Mars Surface, *Planetary and Space Science*, Band 52, 249–257.

Dowman, I. J., Neto, F. und Veillet, I. (1991): Description of Test and Summary of Results – Test of Triangulation of SPOT Data, *OEEPE, No. 26*, 19–40.

Ebner, H. und Müller, F. (1986): Processing of Digital Three Line Imagery Using a Generalized Model for Combined Point Determination, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 26, Part 3/1, 212–222.

Ebner, H. und Ohlhof, T. (1994): Utilization of Ground Control Points for Image Orientation without Point Identification in Image Space, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 30, Part 3/1, 206–211.

Ebner, H. und Strunz, G. (1988): Combined Point Determination Using Digital Terrain Models as Control Information, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 27 (B11), III/578–587.

Förstner, W. (1986): A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 26, Part 3/3, 150–166.

Gruen, A. und Akca, D. (2005): Least Squares 3D Surface and Curve Matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 59, 151–174.

Hechler, M. und Yáñez, A. (2000): Mars Express – Consolidated Report on Mission Analysis Issue 2.0, *Technical Report MEX-ESC-RP-5500*, ESA.

Heipke, C., Jacobsen, K. und Wegmann, H. (2001): The OEEPE-Test on Integrated Sensor Orientation – Analysis of Results, *OEEPE-Workshop Integrated Sensor Orientation*, OEEPE Official publication no. 43, 31–39.

Heipke, C., Schmidt, R., Oberst, J., Neukum, G. und the HRSC Co-Investigator Team (2004): Performance of Automatic Tie Point Extraction Using HRSC Imagery of Mars Express Mission, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35 (B4), 846–851.

Hirsch, H. (2002): Persönliche Mitteilung, DLR Berlin-Adlerhof.

Hofmann, O. (1982): Digitale Aufnahmetechnik, *Bildmessung und Luftbildwesen 50*, 16–32.

Hofmann, O., Kaltenecker, A. und Müller, F. (1993): Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse, *in* Fritsch/Spiller (Herausgeber), *Photogrammetric Week '93*, Wichmann Verlag, Karlruhe, 97–107.

Hofmann, O., Navé, P. und Ebner, H. (1982): DPS - A Digital Photogrammetric System for Producing Digital Elevation Models and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 24-III, 216–227.

Jacobsen, K. (2004): Direct / Integrated Sensor Orientation - Pros and Cons, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35 (B3), 829–835.

Jaw, J.-J. (2000): Control Surface in Aerial Triangulation, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, Part 3B, 444–451.

Kiffer, H., Jakosky, B., Snyder, C. und Matthews, M. (Herausgeber) (1992): *Mars*, The University of Arizona Press, Tucson, London.

Kim, J. R., Muller, J.-P. und Morley, J. (2000): Automated MOLA Track Registration in MOC and Viking Images and its Application for the Establishment of New 3-D Control Points on Mars, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, (4B), 469–475.

Kirk, R. L., Soderblom, L. A., Howington-Kraus, E. und Archinal, B. (2002): USGS High-Resolution Topomapping of Mars with Mars Orbiter Camera Narrow-Angle Images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 34, Part 4, 713–722.

Kornus, W. (1999): *Dreidimensionale Objektrekonstruktion mit digitalen Dreizeilenscannerdaten des Weltraumprojekts MOMS-02/D2*, Dissertationsschrift, DGK-C, Nr. 496, Deutsche Geodätische Kommission, München.

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.

Lanzl, F. (1986): The Monocular Electro-Optical Stereo Scanner (MEOSS) Satellite Experiment, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 26(1), 617–620.

Lauer, M. (2001): Mars Express SOWG#7 – ANNEX 4: Ancillary Data and DDID, *Technical report*, ESA/ESOC.

Lauer, M., Kielbassa, S. und Herfort, U. (2004): Assessment of AOCS In-Orbit Performance for Mars Express and Rosetta, *Proceedings of the 18th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Munich, Germany, 11-15 Oct. 2004.

Lemoine, F., Rowlands, D., Smith, D., Chinn, D., Pavlis, D., Luthcke, S., Neumann, G. und Zuber, M. (1999): Orbit Determination for Mars Global Surveyor During Mapping, *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, AAS Paper 99-328.*

Lemoine, F., Smith, D., Rowlands, D., Zuber, M., Neumann, G., Chinn, D. und Pavlis, D. (2001): An Improved Solution of the Gravity Field of Mars (GMM-2B) from Mars Global Surveyor, *Journal of Geophysical Research*, Band 106(E10), 23,359–23,376.

Levinthal, E., Green, W., Cutts, J., Jahelka, E., Johansen, R., Sander, M., Seidman, J., Young, A. und Sonderblom, L. (1973): Mariner 9 – Image Processing and Products, *ICARUS*, Band 18, 75–101.

Malin, M., Danielson, G., Ravine, M. und Soulanille, T. (1991): Design and Development of the Mars Observer Camera, *International Journal of Imaging Systems and Technology*, Band 3, 76–91.

Malin, M. und Edgett, K. (2001): The Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera: Interplanetary Cruise through Primary Mission, *Journal of Geophysical Research*, Band 106(E10), 23429–23570.

Montenbruck, O. und Gill, E. (2000): *Satellite Orbits*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Morley, T., Budnik, F., Mackenzie, R. und Faehling, N. (2004): Mars Express Navigation for Beagle 2 Separation and Mars Orbit Insertion, *Proceedings of the 18th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Munich, Germany, 11-15 Oct. 2004.

Müller, F. (1991): *Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras*, Dissertationsschrift, DGK-C, Nr. 372, Deutsche Geodätische Kommission, München.

Neukum, G. (1999): The Airborne HRSC-A Performance Results and Applications Potential, *in* Fritsch/Spiller (Herausgeber), *Photogrammetric Week '99*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 83–88.

Neukum, G., Jaumann, R. und the HRSC Co-Investigator and Experiment Team (2004): HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars Exrpress, *in* A. Wilson und A. Chicarro (Herausgeber), *Mars Express: the scientific payload*, Band ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 17–35.

Neumann, G., Lemoine, F., Smith, D. und Zuber, M. (2003): The Mars Orbiter Laser Altimeter Archive: Final Precision Experiment Data Record Release and Status of Radiometry, *Lunar and Planetary Science XXXIV, Abstract #1978*, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM).

Neumann, G., Rowlands, D., Lemoine, F., Smith, D. und Zuber, M. (2001): The Crossover Analysis of Mars Orbiter Laser Altimeter Data, *Journal of Geophysical Research*, Band 106(E10), 23,753–23,768.

Oda, K., Doihara, T., Uchida, O. und Shibasaki, R. (2000): DSM Based Orientation Technique for Digital Stereo Photo Images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, Part 3B, 651–656.

Ohlhof, T. (1996): *Lokale, regionale und globale Punktbestimmung mit Dreizeilenbilddaten und Bahninformation der Mars 96-Mission*, Dissertationsschrift, DGK-C, Nr. 445, Deutsche Geodätische Kommission, München.

Pulido-Cobo, J. und Schoenmaekers, J. (2004): Combined Control of the Operational Mars Express Orbit and the S/C Angular Momentum, *Proceedings of the 18th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Munich, Germany, 11-15 Oct. 2004.

Roatsch, T. (2005): Persönliche Mitteilung, DLR Berlin-Adlerhof.

Rosenholm, D. und Torlegård, K. (1988): Three-Dimensional Absolute Orientation of Stereo Models Using Digital Elevation Models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 54, No. 10, 1385–1389.

Schmidt, R. (2007): Persönliche Mitteilung, Leibniz Universität Hannover.

Schmidt, R., Heipke, C., Brand, R., Neukum, G. und the HRSC Co-Investigator Team (2005): Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 373–379.

Schneider, M. (1988): *Satellitengeodäsie*, Wissenschaftsverlag, Mannheim Wien Zürich.

Scholten, F., Gwinner, K. und Wewel, F. (2002): Angewandte digitale Photogrammetrie mit der HRSC, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 317–332.

Schwarz, G. (1995): On-Board Image Data Compression – The Data Compression Electronics of the High Resolution Stereo Camera (HRSC), *Internal report*, DLR, German Remote Sensing Data Center, Wessling, Germany.

Shan, J., Yoon, J.-S., Lee, D. S., Kirk, R. L., Neumann, G. A. und Acton, C. H. (2005): Photogrammetric Analysis of the Mars Global Surveyor Mapping Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 71, No. 1, 97–108.

Simpson, R. (Herausgeber) (2005): *Science Data Products – Archive*, Mars Global Surveyor Radio Science Team, http://pds-geosciences.wustl.edu/geodata/mgs-m-rss-5-sdp-v1/mors_1033/.

Sjogren, W. (1979): Mars Gravity: High-Resolution Results from Viking Orbiter 2, *Science*, Band 203, 1006–1010.

Smith, D., Zuber, M., Frey, H., Garvin, J., Head, J., Muhleman, D., Pettengill, G., Phillips, R., Solomon, S., Zwally, H., Banerdt, W., Duxbury, T., Golombek, M., Lemoine, F., Neumann, G., Rowlands, D., Aharonson, O., Ford, P., Ivanov, A., Johnson, C., McGovern, P., Abshire, J., Afzal, R. und Sun, X. (2001): Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment Summary After the First Year of Global Mapping of Mars, *Journal of Geophysical Research*, Band 106(E10), 23,689–23,722.

Snyder, C. (1977): The Missions of the Viking Orbiters, *Journal of Geophysical Research*, Band 82, 3971–3983.

Space Research Institute – Russian Academy of Sciences (Herausgeber) (1992): *Mars - 94, Unmanned Spacecraft Mission to Mars*, Space Research Institute, Moscow, Russia.

Strunz, G. (1993): *Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen*, Dissertationsschrift, DGK-C, Nr. 408, Deutsche Geodätische Kommission, München.

Tang, L. und Heipke, C. (1996): Automatic Relative Orientation of Aerial Images, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 62, 47–55.

Tsuno, K., Murai, S., Shibasaki, R., Gruen, A. und Zhang, L. (2004): Starimager – A New Airborne Three-Line Scanner for Large-Scale Applications, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35 (B1), 226–234.

Tyler, G., Balmino, G., Hinson, D., Sjogren, W., Smith, D., Simpson, R., Asmar, S., Priest, P. und Twicken, J. (2001): Radio Science Observations with Mars Global Surveyor: Orbit Insertion through One Mars Year in Mapping Orbit, *Journal of Geophysical Research*, Band 106(E10), 23,327–23,348.

Wewel, F. (1996): Determination of Conjugate Points of Stereoscopic Three Line Scanner Data of Mars 96 Mission, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, Part B3, 936–939.

Wewel, F., Scholten, F., Neukum, G. und Albertz, J. (1998): Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC - Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 337–348.

Wilson, A. und Chicarro, A. (Herausgeber) (2004): *Mars Express: the scientific payload*, Band ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division.

Wu, S. und Schafer, F. (1984): Mars Control Network, *50th Annual Meeting of the American Society of Photogrammetry*, Band 2, 456–463.

Yoon, J.-S. und Shan, J. (2005): Combined Adjustment of the MOC Stereo Imagery and MOLA Altimetry Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Band 71, No. 10, 1179–1186.

Zeitler, W. (1999): *Simultane Neuausgleichung des globalen 3D-Mars-Netzes*, Dissertationsschrift, DGK-C, Nr. 511, Deutsche Geodätische Kommission, München.

Zeitler, W., Ohlhof, T. und Ebner, H. (2000): Recomputation of the Global Mars Control-Point Network, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 66, No. 2, 155–161.

Zuber, M., Smith, D., Solomon, S., Muhleman, D., Head, J., Garvin, J., Abshire, J. und Bufton, J. (1992): The Mars Observer Laser Altimeter Investigation, *Journal of Geophysical Research*, Band 97, 7781–7797.

Dank

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Heinrich Ebner, dem ehemaligen Vorstand des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung. Er hat das der Arbeit zugrunde liegende Projekt als CoI initiiert und somit diese Arbeit erst ermöglicht. Während der ganzen Zeit stand er mir umfassend mit Rat und Tat zur Seite, besonders nach seinem Ausscheiden als Lehrstuhlvorstand.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke für die Diskussionen, manch guten Ratschlag und für die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Dem CoI im Projekt und Leiter des Fachgebiets Photogrammetrie und Fernerkundung, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla, möchte ich für die nötige Freiheit bei meiner Projektarbeit und die Entlastung von allgemeinen Aufgaben am Fachgebiet gegen Ende der Arbeit danken. Ebenfalls danke ich ihm für die Übernahme des dritten Gutachtens.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Gerhard Neukum, dem PI der HRSC bedanken, denn ohne ihn wäre die HRSC nicht an Bord von Mars Express. Auch gilt mein Dank dem DLR, welches das Projekt mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung bzw. seit 01.03.2006 mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 50 QM 0103 gefördert hat.

Herrn Dipl.-Ing. Ralph Schmidt gilt besonderer Dank für die oft stundenlangen, manchmal auch schwierigen Diskussionen per Telefon und per E-Mail, die aber nötig und hilfreich waren, um die Projektarbeit zum Erfolg zu führen. Auch danke ich ihm für die vielen gelieferten zugeordneten Bildkoordinaten, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für die vielen Diskussionen im Rahmen des Projekts mit den Mitarbeitern des Instituts für Planetenfernerkundung des DLR Berlin, besonders mit Herrn Dr. Bernd Giese, Herrn Dipl.-Ing. Frank Scholten, Herrn M.A. Dipl.-Geol. Klaus Gwinner, Frau Dipl.-Phys. Marita Wählisch, Herrn Dr. Thomas Roatsch und Herrn Dr. Jürgen Oberst, möchte ich mich bedanken.

Für die erfolgreiche Missionsplanung sowie die Erfassung und Bereitstellung der Daten danke ich den HRSC Experiment Teams am DLR Berlin und an der Freien Universität Berlin ebenso wie den Mars Express Projekt Teams bei ESTEC und am ESOC.

Für die Arbeit von Herrn Dipl.-Ing. Stefan Gernhardt möchte ich mich herzlich bedanken. Er hat über 4 Jahre hinweg viele Stunden in die Entwicklung eines Programms investiert, mit dem die Ergebnisse der Bündelausgleichung visualisiert werden können. Mit diesem Visualisierungtool wurde die Evaluierungsarbeit der vielen ausgewerteten Streifen wesentlich erleichtert. Frau Dipl.-Ing. Claudia Stummer, Frau Dipl.-Ing. Liselotte Zenner und Herrn Dipl.-Ing. Werner Liebhart gilt mein Dank. Sie haben besonders in der Anfangsphase des Projekts das Programmpaket HWBundle getestet und, als die ersten Daten der HRSC verfügbar waren zur Massenauswertung der Daten beigetragen.

Auch möchte ich mich bei den aktuellen und ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung, des Fachgebiets für Photogrammetrie und Fernerkundung und des Lehrstuhls für Methodik der Fernerkundung für die gute Zusammenarbeit bedanken. Bei Herrn Dr.-Ing. Albert Baumgartner möchte ich mich für die sehr gute Betreuung zu Beginn meiner Arbeit und für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken. Besonders gilt mein Dank den Mitarbeitern, die mir bedingungslos ihre Arbeitsplatzrechner während der Nacht und am Wochenende zur Verfügung stellten, um die Massen an Daten prozessieren zu können.

Für die moralische Unterstützung beim Anfertigen der Arbeit danke ich ganz besonders meinen Eltern, meinen Geschwistern und meinen Freunden, die mich immer wieder ermunterten die Arbeit abzuschließen. Für das Korrekturlesen der Arbeit möchte ich außerdem Frau Dipl.-Ing. Sonja Schneider, Herrn Dipl.-Ing. Konrad Eder und Herrn Dr.-Ing. Manfred Stephani danken.

Lebenslauf

Name:	Michael Spiegel
Geburtsort:	Nürnberg
Geburtsdatum:	26. Dezember 1974

1982 – 1994	Rudolf Steiner - Schule Nürnberg Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
1994 – 1995	Grundwehrdienst
1995 – 2000	Studium der Geodäsie an der Technischen Universität München Abschluss: Diplom-Ingenieur
2000 – 2001	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Vermessungskunde der Bauhaus-Universität Weimar
2001 – 2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München
seit 2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München