Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 858

Jonas Bostelmann

Systematische Bündelausgleichung großer photogrammetrischer Blöcke einer Zeilenkamera am Beispiel der HRSC-Daten

München 2020

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 | ISBN 978-3-7696-5270-3

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 365, Hannover 2020

Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 858

Systematische Bündelausgleichung großer photogrammetrischer Blöcke einer Zeilenkamera am Beispiel der HRSC-Daten

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie

der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jonas Bostelmann

Geboren am 21.09.1982 in Hannover

München 2020

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5270-3

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 365, Hannover 2020

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)
Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München
Telefon +49 – 331 – 288 1685 ● Telefax +49 – 331 – 288 1759
E-Mail post@dgk.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Monika Sester

Referent: Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann
Prof. Dr. Jürgen Oberst (TU Berlin)

Tag der mündlichen Prüfung: 06.04.2020

© 2020 Bayerische Akademie der Wissenschaften, 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 978-3-7696-5270-3

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung der Aufnahmen einer Zeilenkamera beschrieben. Es wurde zur systematischen Bündelausgleichung großer Blöcke, bestehend aus den Bildstreifen der High Resolution Stereo Camera (HRSC), entwickelt. Die HRSC umkreist bereits seit Ende 2003 den Planeten Mars. Sie ist an Bord der europäischen Weltraummission Mars Express. Die Kamera wurde unter Berücksichtigung von photogrammetrischen Aspekten entwickelt und liefert stereoskopische Aufnahmen, aus denen sich dreidimensionale Daten ableiten lassen. Die spektralen Kanäle dieser Zeilenkamera zeichnen zusätzlich Farbinformation auf. Da sich benachbarte Streifen überlappen, ist es möglich, photogrammetrische Blöcke zu bilden und großflächige Mosaike zu erstellen. Diese bilden eine einzigartige Grundlage für die Kartierung der Marsoberfläche mit hoher geometrischer Auflösung und Konsistenz. Für eine präzise Passgenauigkeit der Streifen ist es notwendig, die Orientierungsdaten, welche Position und Ausrichtung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme beschreiben, in einer Bündelausgleichung zu rekonstruieren.
Die dafür notwendigen Methoden werden in dieser Arbeit in vier Abschnitten beschrieben und entsprechend in der Umsetzung in vier Module eingeteilt. Es handelt sich dabei um: 1) die Vorverarbeitung der Bilddaten, 2) die Bestimmung von Verknüpfungspunkten durch Bildzuordnung, 3) die Bündelausgleichung mit einem Geländemodell als Passinformation sowie 4) die Evaluierung der Orientierungsdaten. Um auch große Blöcke automatisch und systematisch verarbeiten zu können, wird das vorgestellte Verfahren in zwei Stufen unterteilt: In der ersten Stufe wird die äußere Orientierung jedes Streifens zunächst einzeln bestimmt. Um dabei auch hochfrequente Schwingungen, denen die Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahmen mitunter ausgesetzt ist, modellieren zu können, wird für die Bündelausgleichung das Konzept der Orientierungspunkte erweitert: Indem sich die Distanz zwischen den Orientierungspunkten an die örtliche, von der vorliegenden Bildinformation abhängige Verknüpfungspunktanzahl anpasst, lässt sich die äußere Orientierung für eine deutlich größere Anzahl von Streifen rekonstruieren, als es bislang möglich war. In der zweiten Stufe werden die Orientierungsdaten aller Streifen eines Blocks in einer gemeinsamen Bündelausgleichung optimiert. Um die dafür notwendigen Verknüpfungspunkte zu bestimmen, wird der Block in Teilblöcke unterteilt. Dazu werden zwei neue Varianten vorgestellt und untersucht. Aufgrund der Heterogenität der Streifen und deren Anordnung sind die resultierenden Verknüpfungspunkte ungleichmäßig im Block verteilt und werden durch einen neu entwickelten Verknüpfungspunktfilter optimiert. Der gesamte Ablauf der Bündelausgleichung ist in beiden Stufen so konzipiert, dass sich große Datenmengen automatisch verarbeiten lassen. Einige dafür notwendige Stellgrößen werden im experimentellen Teil dieser Arbeit empirisch bestimmt. Dabei werden auch rechentechnische Aspekte berücksichtigt. Für die Experimente stehen 4418 HRSC-Streifen zu Verfügung. Die Orientierungsdaten nach der Bündelausgleichung werden jeweils mit den nominellen Daten verglichen. So wird zunächst der Einfluss des neuen Ansatzes mit variabler Orientierungspunktdistanz systematisch untersucht. Anschließend wird gezeigt, dass sich die Genauigkeit der Daten bei 96,2 % der Streifen durch die Bündelausgleichung steigert. Zur Validierung der zweiten Stufe des Verfahrens werden zunächst einzelne Blöcke unterschiedlicher Größe exemplarisch betrachtet. Daraufhin wird die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Daten anhand von insgesamt 32 regionalen Blöcken bestätigt. Die jeweils resultierenden Orientierungsdaten werden ebenfalls systematisch evaluiert. Es wird dabei aufgezeigt, dass sich die Passgenauigkeit der Streifen für alle Blöcke deutlich steigert: Abweichungen, gemessen als Raumstrecke zwischen Objektpunkten in benachbarten Streifen, reduzieren sich im Durchschnitt von 142,9 m auf 55,3 m.
Schlagworte: Photogrammetrie, Bündelausgleichung, Zeilenkamera, HRSC, Verknüpfungspunkte

Abstract

This thesis describes a method for the photogrammetric processing of the images of a line scanner camera. It was developed for the systematic bundle adjustment of large blocks consisting of image strips taken by the High Resolution Stereo Camera (HRSC). The HRSC has been orbiting Mars since the end of 2003 on board of the European space mission Mars Express. The camera was developed considering photogrammetric aspects. It provides stereoscopic images from which three-dimensional data can be derived. The spectral channels of this line scanner camera also record colour information. Since adjacent strips overlap, it is possible to form photogrammetric blocks and create large mosaics. These are a unique basis for mapping the surface of Mars with high geometric resolution and consistency. For this, a precise fit of the strips is crucial. Therefore, it is necessary to reconstruct the orientation data, which provide the position and attitude of the camera at the moment of the image aquisition, in a bundle adjustment.

In this thesis the methods required for this process are described in four sections, which correspond with the four modules in the implementation. These are 1) the pre-processing of the image data, 2) the determination of tie points by image matching, 3) the bundle adjustment with a terrain model as control information as well as 4) the evaluation of the orientation data. In order to be able to process large blocks automatically and systematically, the presented process is divided into two stages: In the first stage, the exterior orientation of each strip is determined individually. The camera is sometimes exposed to high-frequency oscillations at the time of recording. In order to be able to model such oscillations, the concept of orientation points within the bundle adjustment is extended. The local number of tie points depends on the available image information. By adapting the distance between the orientation points based on the local number of tie points, the exterior orientation can be reconstructed for considerably more strips than it was previously possible. In the second stage, the orientation data of all strips of a block are optimised in a common bundle adjustment. To determine the necessary tie points, the block is divided into sub-blocks. For this two new variants are presented and investigated. Due to the heterogeneity of the strips and their arrangement, the resulting tie points are distributed unevenly in the block and are optimised by a newly developed tie point filter. In both stages, the process of the bundle adjustment is designed in such a way that large amounts of data can be processed automatically. Some of the necessary parameters of the process are empirically determined in the experimental part of this work. Computational aspects are also taken into account. For the experiments 4418 HRSC strips are available. The orientation data after the bundle adjustment are compared to the nominal data. First, the influence of the new approach with a variable orientation point distance is systematically investigated. Subsequently, it is shown that the bundle adjustment increases the accuracy of the data at 96,2 % of the strips. In order to validate the second stage of the process, individual blocks of different sizes are considered as examples. Subsequently, the transferability of the process to other data is confirmed on the basis of 32 regional blocks. The resulting orientation data is systematically evaluated. It shows that the fitting of the strips for all blocks increases significantly: deviations, measured as the spatial distance between object points in adjacent strips, decrease on average from 142.9 m to 55.3 m.

Keywords: Photogrammetry, Bundle Adjustment, Line Scanner, HRSC Tie Points

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **11**
- 1.1. Motivation . . . 11
- 1.2. Zielsetzung und Beitrag der Arbeit . . . 14
  - 1.2.1. Zielsetzung . . . 14
  - 1.2.2. Beitrag der Arbeit . . . 14
- 1.3. Gliederung . . . 14

2. Stand der Forschung **15**
- 2.1. Bündelausgleichung . . . 15
  - 2.1.1. Zeilenkamera-Bilder . . . 16
  - 2.1.2. DGM als Passinformation . . . 18
- 2.2. High Resolution Stereo Camera (HRSC) . . . 19
  - 2.2.1. Photogrammetrische Mars-Missionen . . . 20
  - 2.2.2. Mars Express . . . 21
  - 2.2.3. Entwicklung und Aufbau der Kamera . . . 23
  - 2.2.4. Verarbeitung der HRSC-Daten . . . 24

3. Methodik **27**
- 3.1. Mathematisches Modell der Bündelausgleichung . . . 27
  - 3.1.1. Funktionales Modell . . . 29
  - 3.1.2. Interpolation und Distanz zwischen den Orientierungspunkten . . . 30
  - 3.1.3. Stochastisches Modell . . . 31
- 3.2. Systematische Bündelausgleichung der HRSC-Daten . . . 32
  - 3.2.1. Vorverarbeitung . . . 33
  - 3.2.2. Verknüpfungspunktbestimmung . . . 34
  - 3.2.3. Bündelausgleichung . . . 35
  - 3.2.4. Evaluierung der Orientierungsdaten . . . 36
- 3.3. Zweistufige Bündelausgleichung von Zeilenkamera-Blöcken . . . 39
  - 3.3.1. Einzelstreifenausgleichung . . . 40
  - 3.3.2. Konzept der Blockbildung . . . 41
  - 3.3.3. Teilblock-Strategie zur Verknüpfungspunktbestimmung . . . 42
  - 3.3.4. Verknüpfungspunktfilter . . . 46
  - 3.3.5. Blockausgleichung . . . 50
  - 3.3.6. Stellgrößen des Verfahrens . . . 51

4. Experimente und Ergebnisse **53**
- 4.1. Ziele und Daten . . . 53
  - 4.1.1. Zielsetzung der Experimente . . . 53
  - 4.1.2. Verwendete HRSC-Daten . . . 54
- 4.2. Einzelstreifenauswertung . . . 56
  - 4.2.1. Beispiel . . . 56
  - 4.2.2. Schwingungen in den Mars-Express-Orientierungsdaten . . . 62
  - 4.2.3. Globale Einzelstreifenausgleichung . . . 71

4.3. Blockauswertungen 76
4.3.1. Beispiel 76
4.3.2. Untersuchungen zum Verknüpfungspunktfilter 87
4.3.3. Systematische Bündelausgleichung der MC-30-Blöcke 94
4.4. Diskussion der Ergebnisse 108

5. Fazit **109**
5.1. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 109
5.2. Ausblick 111

Literaturverzeichnis **113**

A. Anhang **119**

1. Einleitung

1.1. Motivation

Um unsere Erde besser zu verstehen, lohnt sich ein Blick in den Weltraum. Die Erforschung des Sonnensystems, der Planeten und ihrer Monde leistet einen wichtigen Beitrag für ein besseres Verständnis unseres eigenen Planeten. Forschungen zu seiner Entstehungsgeschichte, dem heutigen Zustand und der zukünftigen Entwicklung können durch Weltraummissionen unterstützt werden. Der Mars als erdähnlicher Planet ist dabei von besonderer Bedeutung. Aus den Erkenntnissen, beispielsweise der Geologie und anderer Geowissenschaften, lässt sich Wissen über die Systeme und Prozesse auf der Erde ableiten. Die zentrale Informationsquelle bei der Erforschung des Mars sind seit jeher Bilder. Durch unterschiedliche passive und aktive Sensoren wird die Oberfläche in immer besserer Qualität abgebildet. Die gewonnenen Bilddaten und ihre photogrammetrische Auswertung schaffen eine breite Datengrundlage für zahlreiche Forschungen.

Während bei der Beobachtung der Erde, vom Satelliten oder aus der Luft, die Aufnahmen in der Regel mit anderen Geoinformationen kombiniert werden, stellen Bilddaten in der planetaren Fernerkundung oft die einzige Informationsquelle dar. So ist beispielsweise eine Referenzierung von Aufnahmen der Marsoberfläche, durch Passpunkte oder ein globales Navigationssatellitensystem, nicht wie auf der Erde realisierbar. Auch eine Unterstützung bei der Auswertung der Daten durch *Ground Truth* ist nahezu nie möglich. Von diesen Einschränkungen abgesehen, lassen sich mit den Methoden der Photogrammetrie Geländemodelle und Orthofotos auch von anderen Planeten wie dem Mars erstellen. Sollen diese Daten die Grundlage für eine genaue Kartierung bilden, sind entsprechend genaue Informationen über die äußere Orientierung, also Position und Lage der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme, erforderlich. Nur durch diese zusätzlichen Informationen können bei der Auswertung die Aufnahmegeometrie durch ein mathematisches Modell präzise rekonstruiert und räumliche Daten mit hoher Genauigkeit erstellt werden.

Unter besonderer Berücksichtigung von photogrammetrischen Aspekten wurde für die Kartierung der Marsoberfläche die *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) entwickelt. Seit Ende 2003 umkreist sie auf der Sonde *Mars Express* den Planeten. Ihre streifenförmigen Bilddaten werden seit über 15 Jahren kontinuierlich zur Erde gesendet. Die ursprünglich bis Ende 2005 geplante Mission wurde zuletzt aufgrund der anhaltend guten Ergebnisse bis Ende 2022 verlängert (Stand Dezember 2019). Als Zeilenkamera mit mehreren Blickrichtungen, hat die HRSC den Vorteil, dass mit jeder Aufnahme das überflogene Gebiet mehrfach stereoskopisch erfasst wird und damit eine dreidimensionale Auswertung jedes Streifens möglich ist. Zwischen den fünf panchromatisch aufzeichnenden Sensorzeilen befinden sich vier weitere Sensorzeilen. Diese zeichnen Bilder in den Wellenlängenbereichen des roten, grünen, blauen und nahinfraroten Lichts auf.[1] Somit lassen sich aus den Aufnahmen der HRSC auch Farbbilder erstellen. Abhängig von ihrer Position im stark elliptischen Orbit zeichnet die Kamera mit einer Auflösung von bis zu 10 m auf. Bei der Planung neuer Aufnahmen werden, sofern möglich, Gebiete ausgewählt, die bislang noch nicht erfasst wurden. Der globale Datensatz nähert sich somit der vollständigen Abdeckung der Planetenoberfläche an.

[1] In dieser Arbeit meint der Begriff *Bild* einen Bildstreifen, welcher durch das Auslesen einer der neun Zeilen entsteht. Die Begriffe *Aufnahme* und *Streifen* meinen jeweils die (bis zu neun) verfügbaren Bilder gemeinsam.

Für immer mehr Bereiche ist es möglich, die HRSC-Streifen zu nahezu lückenlosen Mosaiken zusammenzusetzen. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren bei der photogrammetrischen Auswertung der HRSC-Aufnahmen der Fokus auf die Erstellung großer regionaler Mosaike gelegt. Anstatt digitale Geländemodelle (DGM) und Orthofotos auf Grundlage einzelner Streifen zu erstellen, sollen bei der systematischen Auswertung jeweils mehrere Streifen zusammengesetzt und gemeinsam als Block verarbeitet werden. Die Genauigkeit der nominellen äußeren Orientierung, die für jeden der HRSC-Streifen vorliegt, reicht für ein passgenaues Zusammensetzen der Streifen allerdings nicht aus. Sie wurde aus den durch Dopplermessungen bestimmten Bahnparametern und den durch Sternenkameras kontrollierten Lagewinkeln abgeleitet und weist daher teils große Abweichungen zu der tatsächlichen äußeren Orientierung auf, wie sie jeweils zum Zeitpunkt der Aufnahmen vorlag. Aus diesem Grund erfolgt eine Rekonstruktion der äußeren Orientierung mittels einer Bündelausgleichung. Dabei werden die HRSC-Streifen an das als Referenzsystem vorliegende Geländemodell des *Mars Orbiter Laser Altimeters* (MOLA) angepasst. Für einen kleinen Block, bestehend aus drei Streifen, konnte bereits in der frühen Phase der Mission eine Verbesserung der relativen Passgenauigkeit der Streifen erreicht werden (Spiegel, 2007). Eine systematische Ausgleichung großer regionaler Blöcke, wie sie zur großflächigen Kartierung der Marsoberfläche notwendig wäre, war bislang nicht möglich.

Ein weiteres, bisher ungelöstes Problem sind die durch Eigenschwingungen der Sonde verursachten Verzerrungen einiger Aufnahmen, welche die geometrische Genauigkeit der daraus abgeleiteten Geländemodelle stark mindern. Diese Störungen ließen sich mit den vorliegenden Ansätzen zur Bündelausgleichung nur teilweise beheben. Bei der Auswertung der HRSC-Aufnahmen würden in den Mosaiken Bereiche mit minderer Genauigkeit entstehen.

Kann dieses Problem gelöst werden und gelingt eine genaue Rekonstruktion der äußeren Orientierung großer Blöcke möglichst vollautomatisch, können systematisch DGM- und Orthofoto-Mosaike erstellt werden, welche mit ihrer hohen Auflösung und geometrischen Konsistenz eine einzigartige Datengrundlage für die Kartierung der Marsoberfläche bilden. Beispielsweise zur Beantwortung geologischer Fragestellungen können diese HRSC-Mosaike kartografische Höhen- und Farbinformationen für ganze Regionen des Mars in bislang nicht erreichter Qualität bereitstellen. Abbildung 1.1 zeigt ein solches Mosaik. Dargestellt ist der südwestliche, als `HMC_11W30` (HRSC Mars Chart 11 West 30) bezeichnete, Quadrant der Halbkachel MC-11-W (siehe Abschnitt 3.3.2).

Eine zusätzliche Verwendung der Mosaike ist die Referenzierung anderer Bilddaten: Mit der steigenden Anzahl verfügbarer Bilder von der Marsoberfläche nimmt auch die Anzahl an Anwendungen zu, bei denen die Aufnahmen unterschiedlicher Sensoren miteinander kombiniert werden. Für die dabei notwendige Referenzierung steht das MOLA-DGM als globales Referenzsystem zur Verfügung. Allerdings lassen sich viele Bilder nicht direkt an das MOLA-DGM anpassen. Besonders gilt dies, wenn die geometrische Auflösung der Bilder sehr viel höher ist, als die des MOLA-DGM. Die HRSC-Daten können diese Lücke schließen. Mit ihrer Auflösung von bis zu 10 m können sie auch mit Aufnahmen höchster Auflösung kombiniert werden, während sie gleichzeitig durch die Anpassung an das MOLA-DGM als globale Referenz geeignet sind.

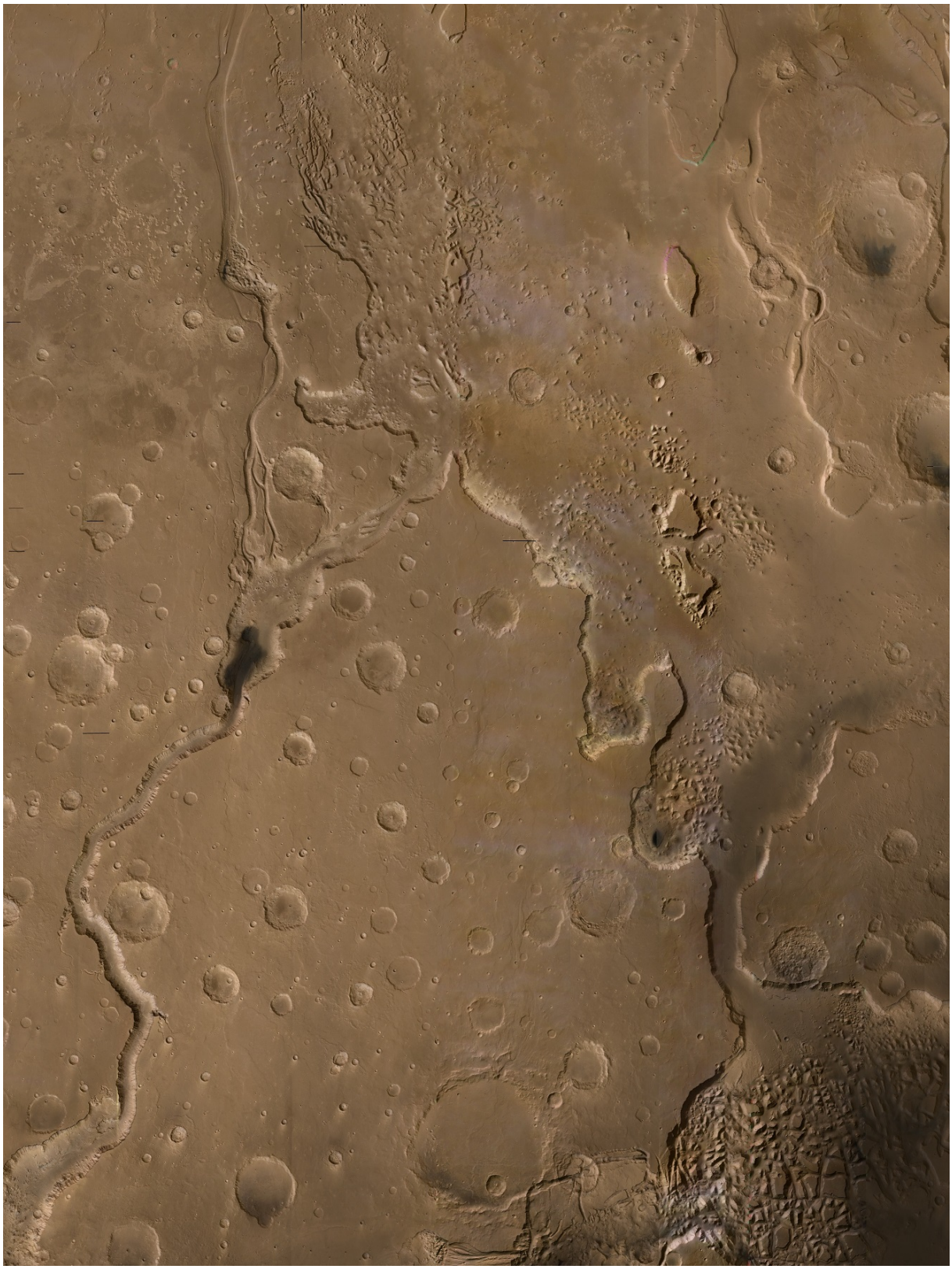


Abbildung 1.1. Aus HRSC-Aufnahmen erstelltes Orthofoto-Mosaik: `HMC_11W30`;
kartierte Fläche: 665 x 890 km; Quelle: ESA/DLR/FU-Berlin/HRSC Science Team

1.2. Zielsetzung und Beitrag der Arbeit

1.2.1. Zielsetzung

Es soll ein photogrammetrisches Verfahren entwickelt werden, mit dem es möglich ist, große heterogene Blöcke einer Zeilenkamera systematisch durch eine Bündelausgleichung zu optimieren. Die äußere Orientierung der Bilddaten soll dabei in einer gemeinsamen Ausgleichung rekonstruiert werden. Die Entwicklung findet im Rahmen der HRSC-Mission statt und soll daher zur Verarbeitung sämtlicher HRSC-Aufnahmen geeignet sein und an diesen auch evaluiert werden. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt daher auf dem experimentellen Teil, in welchem die vorgestellten Lösungsansätze systematisch zur Anwendung kommen und eine anschließende Beurteilung erfolgt. Dabei sollen möglichst viele Daten berücksichtigt werden und das Verfahren vollautomatisch ablaufen. Dafür notwendige Stellgrößen sollen empirisch bestimmt werden.

1.2.2. Beitrag der Arbeit

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit lässt sich in zwei methodische und einen experimentellen Teil gliedern:

- Für eine bessere Modellierung hochfrequenter Schwingungen, denen die Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahmen mitunter ausgesetzt ist, wird das funktionale Modell der Bündelausgleichung erweitert. Der bislang verwendete Ansatz zur Interpolation der Orientierungsdaten wird angepasst, sodass sich die Distanz zwischen den Orientierungspunkten an die lokal vorliegende Verknüpfungspunktanzahl anpasst. Dabei ist neu, dass die Distanzen innerhalb eines Bildstreifens variieren können.
- Um große Blöcke systematisch verarbeiten zu können, wird eine zweistufige Bündelausgleichungsstrategie vorgestellt. Für die Verknüpfungspunktbestimmung wird der Block dabei in Teilblöcke unterteilt, wofür zwei neue Varianten verglichen werden. Für die Nachbearbeitung der resultierenden Verknüpfungspunkte wird ein Filter entwickelt.
- Um das Verfahren zu validieren, werden alle verfügbaren HRSC-Streifen verwendet. Es werden mehrere große Blöcke gebildet. Zunächst dienen die Experimente der Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens. Des Weiteren werden Stellgrößen ermittelt, mit denen auch zukünftig für alle Daten gute Ergebnisse erzielt werden können. Außerdem erfolgt eine systematische Qualitätsbeurteilung der resultierenden Orientierungsdaten.

1.3. Gliederung

Die Arbeit ist in fünf Kapitel gegliedert. Nachdem in diesem Kapitel 1 auf die Motivation und die Zielsetzung der Arbeit eingegangen wurde, wird im folgenden Kapitel 2 der aktuelle Stand der Forschung im Zusammenhang mit der Bündelausgleichung und der HRSC zusammengestellt. In Kapitel 3 wird das entwickelte Verfahren zur zweistufigen Bündelausgleichung beschrieben und dabei auf die mathematischen Details sowie auf die Komponenten und den Ablauf eingegangen. In Kapitel 4 werden die verwendeten Daten und die Ergebnisse einer Reihe durchgeführter Experimente dargestellt und diskutiert. Kapitel 5 fasst die wesentlichen Elemente und Erkenntnisse der Arbeit zusammen und enthält ein abschließendes Fazit.

2. Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung im Zusammenhang mit der Bündelausgleichung und der HRSC dargestellt und es werden daraus Folgerungen für das im Anschluss beschriebene Verfahren abgeleitet. Zuerst wird auf die Besonderheiten der in dieser Arbeit angewendeten Bündelausgleichung eingegangen. Zudem werden im Zusammenhang stehende Arbeiten aufgeführt (siehe Abschnitt 2.1). Anschließend findet in Abschnitt 2.2 die Betrachtung der für diese Arbeit wesentliche Aspekte der HRSC-Mission statt. Neben einer allgemeinen Einordnung sowie einer Beschreibung der Mission *Mars Express* wird vor allem auf die Verwendung und die photogrammetrische Verarbeitung der Bilddaten eingegangen, da sich daraus die Anforderungen an das entwickelte Verfahren ergeben.

2.1. Bündelausgleichung

Zentrales Element der in dieser Arbeit entwickelten Methodik und der durchgeführten Experimente ist das Verfahren der Bündelausgleichung. Die Bündelausgleichung stellt eine wichtige Optimierungsaufgabe der Photogrammetrie dar. Sie ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung der äußeren Orientierung mehrerer Bilder, welche über gemeinsame Bildinformation miteinander verknüpft sind. Gleichzeitig werden dabei auch die räumlichen Koordinaten der verwendeten Verknüpfungspunkte bestimmt. Die Entwicklung der Bündelausgleichung reicht bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück (Schmid, 1958) und fand schon bei der Auswertung analoger Bilder in der analytischen Photogrammetrie Anwendung.[1]

Klassisch findet die Bündelausgleichung in der Luftbildphotogrammetrie seit jeher ihre Anwendung und gewann mit der Digitalisierung der Photogrammetrie an Bedeutung. Ein Block aus Luftbildern wird in der Regel nach photogrammetrischen Gesichtspunkten geplant und ist daher meist regelmäßig angeordnet, weist ausreichende und regelmäßige Überlappung auf und wurde mit einer einheitlichen geometrischen Auflösung, sowie ausreichend gut verteilten Passpunkten, aufgenommen. Zusätzlich oder als Ersatz für die Passpunkte können zur Sensororientierung ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und eine *Inertial Measurement Unit* (IMU) genutzt werden. Zur Aufnahme der Luftbilder werden in der Regel kalibrierte Kameras eingesetzt. Aber auch in der photogrammetrischen Prozesskette terrestrischer Aufnahmen, wo andere Rahmenbedingungen gelten, wird die Bündelausgleichung eingesetzt. Dabei werden auch unkalibrierte Kameras eingesetzt und Bilder in beliebiger Aufnahmekonfiguration ausgewertet (Brown, 1976). Auch im Bereich der Computer Vision, wo sich durch die Entwicklung der digitalen Fotografie immer mehr Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit ergeben, kommt die Bündelausgleichung seit gut zwei Jahrzehnten vermehrt zum Einsatz (Triggs et al., 2000).

[1] In dieser Arbeit wird der Begriff *Bündelausgleichung* verwendet. In anderer deutschsprachiger Literatur ist für dasselbe Verfahren auch *Bündelblockausgleichung* als Begriff geläufig (im Englischsprachigen entsprechend *bundle adjustment* oder *bundle block adjustment*). Beides meint die allgemeinste und genaueste Form der Blockausgleichung. Für dieses Verfahren sind ebenfalls die Begriffe *Blocktriangulation*, *Mehrbildtriangulation*, *Aerotriangulationsausgleichung* als Synonyme geläufig. Da in dieser Arbeit sowohl einzelne HRSC-Streifen als auch Blöcke aus mehreren Streifen bearbeitet werden, wurde bewusst der Begriff *Bündelausgleichung* gewählt, sodass zwischen einer Einzelstreifenausgleichung und einer Blockausgleichung ohne Mehrdeutigkeit unterschieden werden kann.

Im einfachsten Fall werden für eine Bündelausgleichung die folgenden Eingangsgrößen benötigt: Die Bildkoordinaten homologer Verknüpfungspunkte werden als Beobachtungen verwendet; die Parameter einer bekannten inneren Orientierung als Konstanten; grobe Angaben zur äußeren Orientierung als Näherungswerte für die unbekannten Parameter des mathematischen Modells sowie Objekt- und Bildkoordinaten von Passpunkten zur Referenzierung. Häufig machen es die Anforderungen der jeweiligen Anwendung notwendig, dieses Grundgerüst der Bündelausgleichung zu erweitern: Systematische Abweichungen vom Modell der Zentralperspektive können durch sogenannte zusätzliche Parameter im Bildraum modelliert werden (Ebner 1976; Grün 1978; Jacobsen 1980). Abbildungsfehler können dadurch deutlich reduziert werden und die innere Orientierung der verwendeten Kamera unter bestimmten Voraussetzungen während der Bündelausgleichung mitbestimmt werden. Man spricht dann von einer Simultankalibrierung. Für die HRSC wurde ein Teil der Parameter der inneren Orientierung mit einigen der ersten zur Verfügung stehenden Aufnahmen auf diese Art nachgebessert (Spiegel, 2007).

Eine weitere Möglichkeit, die Bündelausgleichung zu erweitern, ist die Einbeziehung von zusätzlichen Beobachtungen. Zusätzlich zu den Bildkoordinaten können unterschiedlichste geodätische Beobachtungen in die Bündelausgleichung integriert werden. Dazu muss das funktionale Modell der Ausgleichung um entsprechende Beobachtungsgleichungen erweitert werden. Diese Beobachtungsgleichungen stellen den funktionalen Zusammenhang zwischen den unbekannten Parametern des Modells und den jeweiligen Beobachtungen her. Als zusätzliche Beobachtungen können Koordinaten, Koordinatendifferenzen oder Strecken sehr einfach durch Beobachtungsgleichungen in die Ausgleichung integriert werden. Daraus ergibt sich auch die Möglichkeit, ein digitales Geländemodell (DGM) als Passinformation zu verwenden (Ebner und Strunz 1988; Rosenholm und Torlegard 1988; siehe auch Abschnitt 2.1.2).

Außerdem ist es möglich, Elemente der äußeren Orientierung als Beobachtungen einzuführen. Auf der Erde kann die Position beispielsweise aus GNSS-Sensoren abgeleitet werden. Die Lage, welche die Blickrichtung der Kamera beschreibt, kann mit einer IMU oder im Weltraum auch mit Sternenkameras bestimmt werden. Werden die Elemente der äußeren Orientierung mit ausreichend hoher Frequenz und Genauigkeit beobachtet, kann zu ihrer Bestimmung auf eine Bündelausgleichung verzichtet werden (Ackermann, 1984). Man spricht dann von direkter Sensororientierung. Für die Daten der HRSC ist dieses nicht möglich, da weder für die Positionen noch für die Lage ausreichend genaue Beobachtungen vorliegen.

2.1.1. Zeilenkamera-Bilder

Da es sich bei der HRSC um eine Zeilenkamera handelt, muss bei der photogrammetrischen Auswertung auf die Besonderheiten dieser Art von Kameras geachtet werden. Zeilenkameras kommen vor allem in der Fernerkundung auf künstlichen Satelliten im Erdorbit zum Einsatz. Aber auch in der Luftbildphotogrammetrie werden sie verwendet. Hinter einer Optik befinden sich eine oder mehrere quer zur Flugrichtung ausgerichtete Sensorzeilen. Bei Mehrzeilenkameras sind diese meist parallel zueinander mit etwas Abstand angeordnet. Abhängig von der Distanz zwischen Fokusebene und Projektionszentrum ergibt sich daraus ein Beobachtungswinkel entlang der Flugrichtung.

Anders als bei Flächensensorkameras, entstehen bei Zeilenkameras die Aufnahmen nicht im Bruchteil einer Sekunde. Stattdessen wird das aufzunehmende Objekt, z.B. die Geländeoberfläche, während eines einstellbaren Zeitfensters durch kontinuierliches Auslesen der Zeilen erfasst. Da sich die Kamera währenddessen vorwärts bewegt, entstehen, entsprechend der Anzahl der Sensorzeilen, mehrere Bildstreifen.

Bei der photogrammetrischen Auswertung muss berücksichtigt werden, dass jede Bildzeile ihre eigene äußere Orientierung hat. Bei Sensoren mit mehr als einer Zeile teilen sich die gleichzeitig erfassten Bildzeilen jeweils eine gemeinsame äußere Orientierung. Änderungen in Position und Lage der Kamera während der Aufnahme wirken sich auf die Bildinformation aus und müssen daher auch bei der Auswertung berücksichtigt werden. Dazu wurde im Rahmen der Entwicklung von Zeilenkameras das Konzept sogenannter Orientierungspunkte eingeführt (Hofmann et al., 1982). Die äußere Orientierung wird danach nur für wenige ausgewählte Zeilen explizit durch Parameter beschrieben, alle anderen Zeilen nutzen interpolierte Werte. Ermöglicht wird dieses Vorgehen durch die Annahme, dass Position und Lage der Kamera während der Aufnahme keine sprunghaften Änderungen erfahren. Die zu interpolierenden Parameter folgen in diesem Modell einer glatten Kurve, sodass die Werte benachbarter Zeilen stark korrelieren. Durch die Verwendung von Orientierungspunkten ist es möglich, die äußere Orientierung der Aufnahmen von Zeilenkameras durch eine geeignete Erweiterung der Bündelausgleichung mit den klassischen Kollinearitätsgleichungen des Modells der Zentralperspektive zu rekonstruieren. Für die photogrammetrische Auswertung der HRSC-Aufnahmen sind folgende Arbeiten, welche im Rahmen der Vorbereitungen der Missionen MEOSS (Lanzl, 1986), HRSC (Albertz et al., 1993), MOMS-02/D2 und MOMS-2P/PRIRODA (Ackermann et al., 1989) im wesentlichen in München durchgeführt wurden, von zentraler Bedeutung:

Zunächst wurde das Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Auswertung von 3-Zeilenkameras anhand von Simulationen untersucht (Müller, 1991). Dabei wurde das Konzept der Orientierungspunkte übernommen. Die durch die lineare Interpolation zwischen den Orientierungspunkten entstehenden Interpolationsfehler werden dort durch konstante Differenzbeobachtungen zu hochfrequenten Messungen berücksichtigt. Bei den photogrammetrischen Vorbereitungen für die Mars-96-Mission mit den Kameras HRSC und WAOSS (siehe Abschnitt 2.2.2) wurden, als Alternative zu der Interpolation zwischen Orientierungspunkten, physikalisch begründete Satellitenbahnparameter eingeführt und mit den Daten der MOMS-02/D2-Mission getestet (Ohlhof, 1996).

Später wurde für die Auswertung der MOMS-02-Daten wieder der Orientierungspunktansatz aufgegriffen und erweitert. Dabei wurden auch Untersuchungen zum Einfluss der Orientierungspunktdistanz auf die Genauigkeit durchgeführt (Kornus, 1999). Die lineare Interpolation wurde durch Spline-Ansätze und Lagrange-Polynome ersetzt, wobei die Verwendung der Lagrange-Polynome einen praktischen Vorteil aufweist: Beobachtungen der Parameter der äußeren Orientierung können an den Orientierungspunkten direkt als Stützwerte für die Polynome verwendet werden, wodurch sich rechentechnische Vorteile bei der Gleichungslösung ergeben. Aufbauend auf diesen drei Arbeiten wurde eine kombinierte Ausgleichung der HRSC- und MOLA-Daten entwickelt (Spiegel, 2007). Sowohl die dabei entstandenen methodischen Konzepte als auch die Software bilden den Ausgangspunkt der hier vorliegenden Arbeit. Ansonsten existieren nur wenige Alternativen, die für diesen speziellen Sensortyp und die besonderen Bedingungen im Marsorbit für die Bündelausgleichung der HRSC-Daten eingesetzt werden können.

Speziell für die Bündelausgleichung planetarer Bilddaten wurde vom *United States Geological Survey* (USGS) das Softwaremodul *jigsaw* als Modul des Sofwarepackets *ISIS3* (Integrated Software for Imagers and Spectrometers) entwickelt, welches ebenfalls für die HRSC- und andere Zeilenkamera-Bilder geeignet ist (Edmundson et al., 2012). In dem darin verwendeten Ansatz der Bündelausgleichung werden Polynome hoher Ordnung verwendet. Auch mit der kommerziellen Software *SOCET SET* von *BAE Systems* können die Daten der HRSC durch eine Bündelausgleichung verbessert werden, wobei für einige Prozesse *ISIS3* zum Einsatz kommt (Albertz et al. 2005; Kirk et al. 2006). Als weitere Alternative zu der Bündelausgleichung, wie sie von Spiegel (2007) beschrieben und in dieser Arbeit verwendet wird, können die HRSC-Daten mit einer beim DLR entwickelten Methode verbessert werden. Diese setzt nicht auf ein streng physikalisches Modell, sondern reduziert in einem iterativen

Prozess Vorwärtsschnittfehler und MOLA-Abweichungen einer Vielzahl von Punkten durch Anpassung der zeitabhängigen Orientierungsdaten. Gegenüber der Bündelausgleichung (mit konstanter Orientierungspunktdistanz), liefert diese als *Sequential Photogrammetric Adjustment (SPA)* bezeichnete Methode für einige Streifen bessere Ergebnisse (Gwinner et al., 2010). Es ist möglich die SPA-Methode auch im Anschluss an eine Bündelausgleichung anzuwenden. Für Blöcke ist sie aber nicht geeignet.

Auch bei der Mehrzahl der Erdbeobachtungssatelliten handelt es sich um Zeilenkameras. Die aufgenommenen Bildstreifen können an den Übergängen von stückweise glatten Polynomen ersten und zweiten Grades durch Bedingungen stetig gehalten werden (Poli, 2005). Durch sensorspezifische Korrekturparameter kann bei der Auswertung auch ein generisches Modell zur genauen Beschreibung der äußeren Orientierung verwendet werden (Weser et al., 2008). Allerdings werden zur geometrischen Orientierung der Satellitenbilder oftmals *rationale Polynomkoeffizienten* (RPCs) verwendet, mit denen sich die geometrischen Beziehungen zwischen Bild- und den Objektkoordinaten gut approximieren lassen (Poli und Toutin, 2012). Die RPCs werden direkt vom Satellitenbetreiber bereitgestellt und können in der Auswertung unter gewissen Voraussetzungen ohne Verlust bezüglich der geometrischen Genauigkeit verwendet werden (Fraser und Hanley, 2003). In der planetaren Fernerkundung sind PRCs keine Alternative, da ihre Bestimmung die Daten eines GNSS erforderlich macht, weil die Parameter zur Bestimmung der Umlaufbahn ohne GNSS nicht ausreichend gut bestimmbar sind.

2.1.2. DGM als Passinformation

In der klassischen Luftbildphotogrammetrie nutzt man wenn möglich Passpunkte um einen photogrammetrischen Block in ein Referenzkoordinatensystem einzubinden. Passpunkte können in den Bildern identifiziert werden und haben bekannte Objektkoordinaten. Eine Alternative zur Verwendung von Passpunkten ist die direkte Sensororientierung. Für diese sind GNSS- und IMU-Messungen mit ausreichender Genauigkeit und - vor allem bei Zeilenkameras - mit ausreichend hoher Frequenz notwendig. Liegen entsprechende Daten vor, lassen sich daraus die Parameter der äußeren Orientierung direkt ableiten.

Stehen weder Passpunkte noch ausreichende Beobachtungen anderer Sensorik für die absolute Orientierung eines photogrammetrischen Blocks zur Verfügung, kann die Passinformation auch über beobachtete Objektinformation eingeführt werden, ohne dass eine Identifikation in den Bildern erforderlich ist. So kann z.B. ein DGM als Passinformation verwendet werden, indem zusätzliche Beobachtungsgleichungen genutzt werden, um eine Höhendifferenz zwischen den photogrammetrischen Objektpunkten und dem DGM zu beschreiben (Strunz, 1993). Zur Anpassung der HRSC-Daten an das MOLA-DGM wurden von Spiegel (2007) mehrere Ansätze gegenüber gestellt. Der von Strunz (1993) hat sich am geeignetsten erwiesen und wurde in die Bündelausgleichungs-Software für die Zeilenkamera-Bilder der HRSC integriert. Bei der Anwendung hat sich gezeigt, dass eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte vorteilhaft ist. Da der Ansatz auch in dieser Arbeit verwendet wird, sind die Verknüpfungspunktbestimmung, wie sie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben ist, und der Verknüpfungspunktfilter, beschrieben in Abschnitt 3.3.4, darauf angepasst und erzeugen eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Punkte. Ein ganz ähnlicher Ansatz bei dem die Daten eines Laseraltimeters mit den Aufnahmen einer Zeilenkamera kombiniert werden, findet bei der Kartierung der Mondoberfläche Anwendung. Die Daten des *Lunar Orbiter Laser Altimeter* (LOLA) auf der amerikanischen Mondmission *Lunar Reconnaissance Orbiter* werden z.B. mit den Zeilenkamera-Daten der chinesischen Kameramission *Chang'E-2* kombiniert (Wu et al., 2014).

2.2. High Resolution Stereo Camera (HRSC)

Die *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) liefert seit über 15 Jahren Bilder der Marsoberfläche. Die Aufnahmen haben eine Auflösung von bis zu 10 m pro Pixel und enthalten auch Spektralkanäle für Rot, Grün und Blau sowie den Wellenlängenbereich des nahen Infrarots (Neukum et al., 2004). In Abbildung 2.1 ist der Krater Neukum zu sehen. Für diese Darstellung wurden die drei HRSC-Aufnahmen `h2529_0000`, `h4346_0000` und `h4357_0000` zusammengesetzt. Die Bilder der Farbkanäle wurden dabei mit dem panchromatischen Nadirbildern kombiniert, um durch ein Pansharpening ein hochaufgelöstes Farbbild zu erstellen. Der Krater wurde im Jahr 2017 von der *Internationalen Astronomischen Vereinigung* (IAU) nach Gerhard Neukum benannt, der für die Entwicklung der HRSC verantwortlich und bis 2013 *Principal Investigator* (PI) des HRSC-Experiments war. Die HRSC war in der planetaren Fernerkundung die erste Kamera, deren Aufnahmegeometrie es ermöglicht, aus jeder der streifenförmigen Aufnahmen 3D- und Farbinformation abzuleiten. Sie hat zu einer Vielzahl beachtlicher Ergebnisse geführt (Jaumann et al. 2015; Gwinner et al. 2016).



Abbildung 2.1. Krater Neukum: Mosaik aus Aufnahmen der High Resolution Stereo Camera (HRSC), deren Entwicklung auf den Planetenforscher Gerhard Neukum zurückgeht; Quelle: ESA/DLR/FU Berlin

Bevor weiter auf die Details der HRSC eingegangen wird (siehe Abschnitt 2.2.3), soll zur Einordnung zunächst ein kurzer Überblick über frühere und sich aktuell im Marsorbit befindliche Kamera-Missionen gegeben werden.

2.2.1. Photogrammetrische Mars-Missionen

Am 15. Juli 1965 wurde zum ersten Mal ein Foto aus der Nähe eines anderen Planeten - des Mars - aufgenommen. Bis dahin wurden Planeten ausschließlich von der Erde aus beobachtet. Der zivilen US-Bundesbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) gelang es mit der Raumsonden-Mission *Mariner 4*, insgesamt 22 Bilder der Marsoberfläche aufzunehmen. Die quadratischen Aufnahmen hatten jeweils eine Kantenlänge von 200 Pixeln. Die geometrische Auflösung der Aufnahmen betrug mehrere Kilometer (siehe Abbildung 2.2). Mit *Mariner 9* gelang es der NASA sechs Jahre später erstmals eine Sonde in die Umlaufbahn des Mars zu befördern und insgesamt 7 329 Aufnahmen der Marsoberfläche zur Erde zu senden. Die Bilder hatten eine Auflösung von etwa 100 bis 1 000 m, bei einer Bildgröße von 932 x 700 Pixeln. Mit analytischen Plottern konnten diese Aufnahmen photogrammetrisch ausgewertet werden (Levinthal et al., 1973).

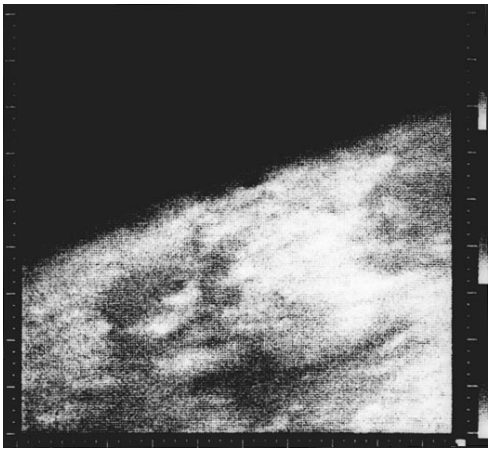


Abbildung 2.2. Erste Nahaufnahme eines anderen Planeten, von der Raumsonde *Mariner 4* im Vorbeiflug am Mars aufgenommen; Quelle: NASA, 1965

Der nächste große Meilenstein bei der Kartierung des Mars gelang 1975 mit der *Viking*-Mission. Die Raumsonden *Viking 1* und *Viking 2* lieferten insgesamt rund 50 000 Bilder der Oberfläche, jeweils mit einer Auflösung von 1 056 x 1 182 Pixeln. Diese Aufnahmen bilden noch heute die Grundlagen für aktuelle Passpunktnetze (Zeitler, 1999) und globale Mosaike (Archinal et al., 2004).

Im September 1997 erreichte die Sonde *Mars Global Surveyer* (MGS) den Planeten. Zu den Instrumenten dieses Orbiters zählt unter anderem das Kamerasystem *Mars Orbiter Camera* (MOC). Dieses besteht aus drei panchromatischen CCD-Zeilenkameras (Malin und Edgett, 2001): zwei Weitwinkelkameras mit einer maximalen Auflösung von rund 250 m und einer Sensorbreite von 3 456 Pixeln sowie einer hochaufgelösten Schmalwinkelkamera mit einer Auflösung von bis zu 1,4 m pro Pixel. Die Sensorbreite beträgt bei letzterer 2 048 Pixel. Außerdem befand sich an Bord des Orbiters das *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA). Dieses lieferte über 640 Millionen Entfernungsmessungen zwischen Orbiter und Marsoberfläche (Smith et al., 2001). Bei einer Flughöhe von 400 km hatten die Laserpunkte einen Durchmesser von rund 168 m und entlang der Flugrichtung einen Abstand zum jeweils vorigen Punkt von rund 300 m am Boden. Mit den aufgenommenen Laserspur-Daten gelang es, die Topographie des Mars global abzubilden. Aus den Profildaten wurde durch Interpolation ein DGM im Rasterformat mit der Bezeichnung *MOLA Experiment Gridded Data Record* (MEGDR) abgeleitet (Smith et al., 2003). Dieser in Abbildung 2.3 gezeigte Datensatz wird auch für die in Kapitel 3 beschriebene Bündelausgleichung der HRSC-Daten verwendet. Die Auflösung dieses MOLA-DGM beträgt am Äquator 463 m und weist insgesamt eine hohe globale Konsistenz und Höhengenauigkeit auf. Deshalb gilt dieses DGM für den Mars als anerkanntes, viel verwendetes Referenzsystem.

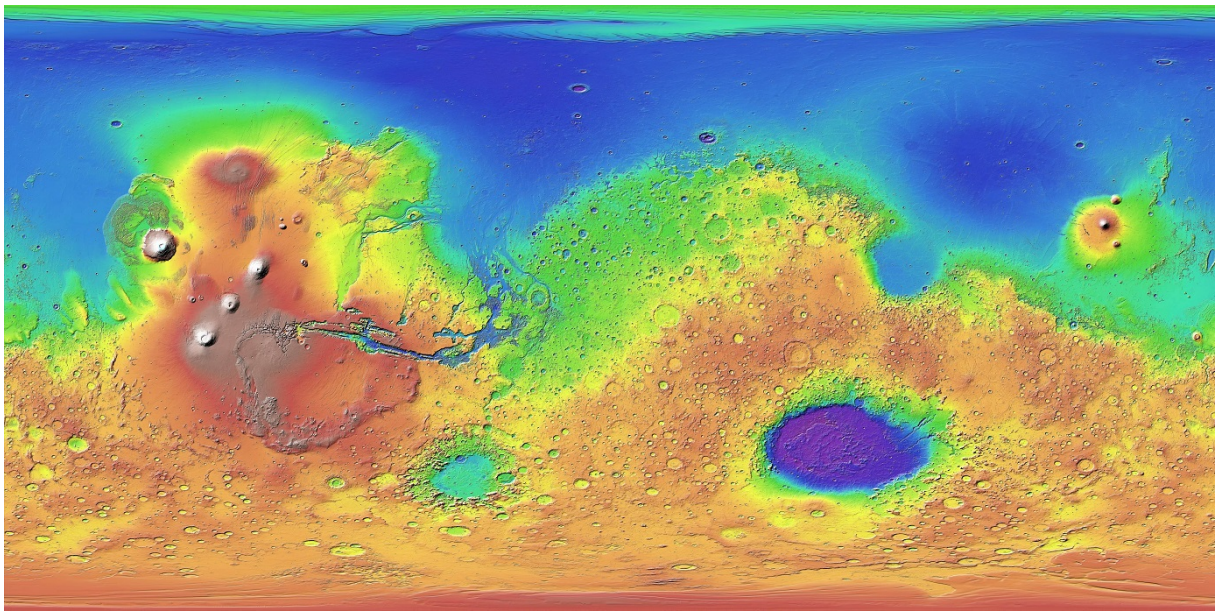


Abbildung 2.3. Farbcodierte Darstellung des im Rasterformat vorliegenden MOLA-DGM; *MOLA Experiment Gridded Data Record* (MEGDR); Quelle: USGS, 2019

Seit 2006 befindet sich der *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) mit zwei für die topographische Aufnahme relevanten Instrumenten im Marsorbit: Die Kamera des *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE) ist die bislang größte Kamera, die den Mars umkreist und hat eine Auflösung von bis zu 30 cm. Es handelt sich um eine Zeilenkamera mit drei Kanälen. Der rote Kanal erfasst die Oberfläche mit einer Sensorzeile von 20 048 Pixeln. Der grüne und blaue Kanal besitzen jeweils 4 048 Pixel. Die Länge der Bildstreifen umfasst üblicherweise 126 000 Zeilen. Ergänzend zu der HiRISE-Kamera ist die *Context Camera* (CTX) als panchromatische Zeilenkamera konzipiert. Sie hat eine Sensorbreite von 5 064 Pixeln und eine Auflösung von rund 6 m.

Bei den bisher hier aufgeführten Missionen handelt es sich ausschließlich um von der NASA ausgeführte US-amerikanische Mars-Missionen. 2014 traf mit der *Mars Orbiter Mission* die erste indische Planetenmission am Mars ein. Mit der *Mars Color Camera* (MCC) befindet sich nun eine weitere Kamera mit 2 048 x 2 048 Pixeln Sensorgröße im Orbit (Arya et al., 2014). Ihre geometrische Auflösung variiert sehr stark in Abhängigkeit von der Flughöhe und erreicht Bodenpixelgrößen von 20 m bis 4 000 m. Im Rahmen des *ExoMars* Programms der *European Space Agency* ESA erreichte der Trace Gas Orbiter (TGO) 2016 den Mars. An Bord befindet sich das *Colour and Stereo Surface Imaging System* (CaSSIS). Diese Push-Frame-Kamera hat eine Auflösung von 4,6 m pro Pixel und eine Sensorgröße von 2 048 x 256 (Gambicorti et al., 2016). Ihre Aufnahmen sind ebenfalls zur stereoskopischen Auswertung geeignet (Cremonese et al., 2017).

2.2.2. Mars Express

Mars Express ist die erste Weltraummission der *Europäischen Weltraumorganisation* ESA, welche zu einem anderen Planeten geschickt wurde. Die mit 1,5 m Kantenlänge würfelförmige Sonde besitzt zwei Solarpanele mit rund 12 m Spannweite. Das Startgewicht betrug 1 223 kg.

Mit dem Zusammenbruch der Sowjetunion 1991 und dem Wegfall der finanziellen Mittel wurde ein für die 90er Jahre geplantes, ambitioniertes sowjetisches Mars-Programm gestrichen.

Teile der Projekte konnten jedoch mit finanzieller Unterstützung aus Europa mit der *Mars-96*-Mission (ursprünglich *Mars-94*) realisiert werden. Ziel der Mission war unter anderem die systematische Kartierung der Marsoberfläche. Dazu wurden zwei in Deutschland entwickelte Zeilenkameras auf dem Orbiter installiert (Albertz et al., 1993), mit einem Schwadwinkel von 80° der *Wide Angle Optoelectronic Stereo Scanner* (WAOSSS) und mit einem Schwadwinkel von 12° die *High Resolution Stereo Camera* (HRSC). Beim Start von *Mars 96* im November 1996 versagte bei der Proton-Rakete die Zündung der letzten Trägerstufe und die Sonde stürzte in den Pazifik.

Von einigen der Instrumente, welche mit *Mars 96* zum Einsatz kommen sollten, existierten Ersatzmodelle. Diese wurden von der ESA für die Mission *Mars Express* verwendet. Bereits nach relativ kurzer Zeit, am 2. Juni 2003, konnte *Mars Express* mit einer *Soyuz-FG/Fregat* vom Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan starten. Noch im selben Jahr, am 25. Dezember, erreichte die Sonde den Mars (siehe Abbildung 2.4). Ursprünglich war die Mission für ein Marsjahr (dieses entspricht in etwa zwei Erdenjahren) bis Ende 2005 geplant. Aufgrund des anhaltenden Erfolges der Mission und der langlebigen Technik wurde sie bereits mehrmals verlängert und soll aktuell bis Ende 2022 laufen (Stand Dezember 2019).

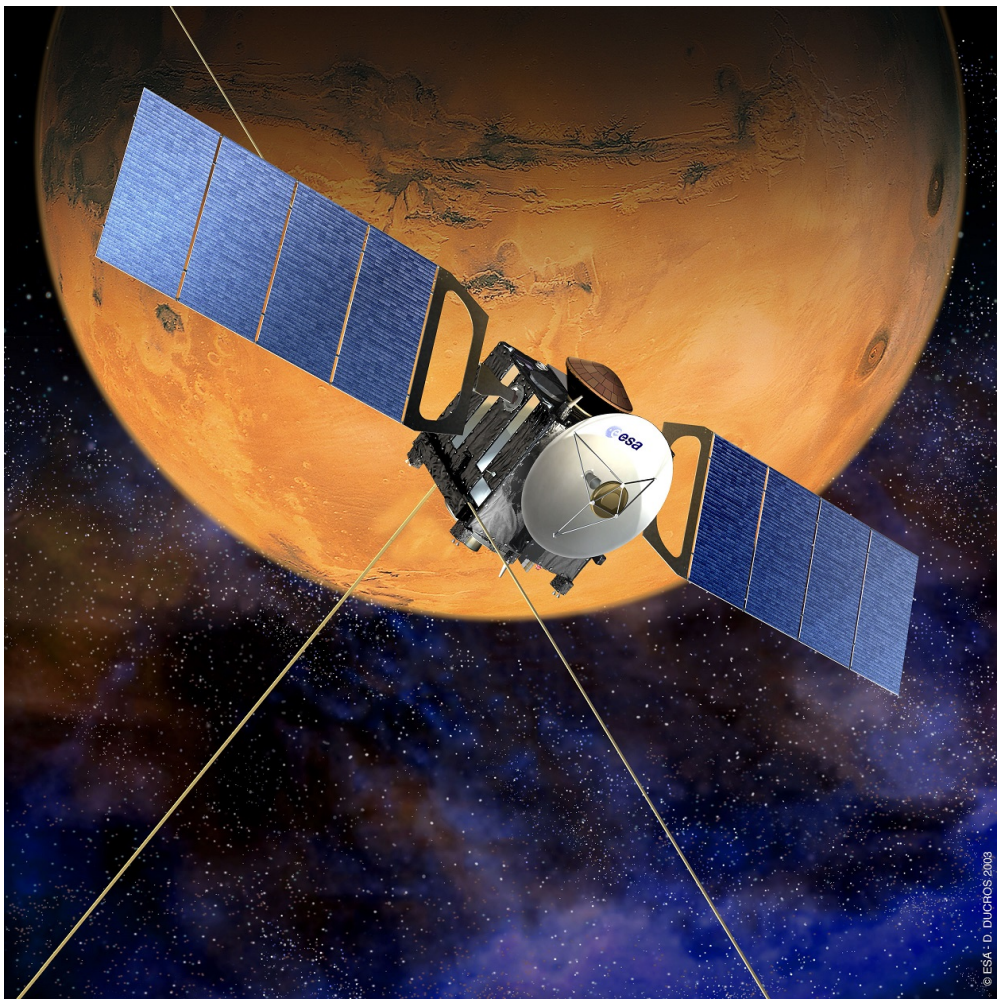


Abbildung 2.4. Die ESA-Raumsonde *Mars Express* im Orbit des Mars (künstlerische Darstellung); Quelle: ESA, 2019

Mars Express befindet sich in einem stark elliptischen Orbit. Die Länge der großen Halbachse beträgt ca. 8 600 km, die numerische Exzentrizität 0,61. Der Orbit wurde so gewählt, damit der geringe Abstand zwischen Satellit und Mars im Perizentrum von durchschnittlich 287 km entsprechende hochaufgelöste Aufnahmen mit der HRSC ermöglicht. Das Apozentrum liegt mit 10 117 km erheblich weiter vom Planeten entfernt. Die benötigte Zeit für einen Umlauf des Orbiters beträgt 6,72 h, die Inklination dabei 86°. An Bord des Orbiters befinden sich sieben wissenschaftliche Experimente, welche von unterschiedlichen Nationen betrieben werden. Zu den Zielen der Mission zählen, neben der globalen, hochaufgelösten Erfassung der Topographie, auch eine morphologische und mineralogische Kartierung sowie Analysen atmosphärischer Vorgänge. Dem gemeinsam mit dem Orbiter zum Mars gelangten Lander *Beagle 2* missglückte die Landung. Abgesehen davon handelt es sich bei *Mars Express* um eine der erfolgreichsten Marsmissionen.

2.2.3. Entwicklung und Aufbau der Kamera

Bei der HRSC (siehe Abbildung 2.5) an Bord des *Mars-Express*-Orbiters handelt es sich um eine Zeilenkamera, die ursprünglich am Institut für Optoelektronik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen[2] unter der Leitung von Gerhard Neukum für die Mars-96-Mission entwickelt wurde. Es ist in der planetaren Fernerkundung die erste Stereokamera mit Farbkanälen. Sie wurde eigens für die systematische Kartierung der Marsoberfläche entwickelt (Schmidt et al., 2017).



Abbildung 2.5. Die High Resolution Stereo Camera (HRSC); Quelle: DLR, 2019

Die stereoskopischen Aufnahmen werden durch insgesamt neun CCD-Zeilen realisiert, welche hinter einem Objektiv mit 175 mm Brennweite auf der Sensorebene parallel und quer zur Flugrichtung angeordnet sind. Fünf Zeilen (*Nadir*, *Photometrie*, *Stereo*) zeichnen das einfallende Licht in einem panchromatischen Bereich auf (675 ± 90 nm). Die übrigen vier Zeilen sind mittels Spektralfilter auf die jeweiligen Farbbereiche für Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot abgestimmt (BL: 440 ± 40 nm, GR: 540 ± 45 nm, RE: 750 ± 25 nm, NIR: 955 ± 40 nm). Durch die unterschiedlichen Positionen der Sensorzeilen auf der Sensorebene ergeben sich für die einzelnen Zeilen Stereowinkel als Beobachtungsrichtungen entlang der Flugrichtung. Die Abweichungen vom Nadirwinkel (ND) betragen $\pm 12{,}8°$ für die *Photometrie*-Zeilen (P1, P2) und $\pm 18{,}9°$ für die *Stereo*-Zeilen (S1, S2). Jede Sensorzeile besteht aus 5 272 Sensorelementen, von denen 5 184 aktiv für die Bildaufnahme verwendet werden. Die quadratischen Sensorelemente haben eine Kantenlänge von 7 µm. Quer zur Flugrichtung liegt ein Öffnungswinkel von etwa 12° vor.

[2] heute: Institut für Planetenforschung des DLR in Berlin-Adlershof

Bei einer Flughöhe von 250 km ergibt sich daraus eine Bodenauflösung von rund 10 m, mit der ein Gebiet von etwa 50 km Schwadbreite abgedeckt wird. Da sich *Mars Express* in einem stark elliptischen Orbit befindet, variiert die Flughöhe des Orbiters teils auch innerhalb eines Streifens deutlich. Daraus resultiert auch eine Variation der Bodenauflösung und der Streifenbreite. Da sich in einem elliptischen Orbit auch die Fluggeschwindigkeit ändert, muss die Auslesefrequenz innerhalb einer Streifenaufnahme ebenfalls angepasst werden, um die Objektpixellänge entlang der Flugrichtung an die vorliegende Pixelbreite anzupassen und quadratische Pixel zu erhalten. Die Anzahl der erfassten Bildzeilen und damit die Länge der Bildstreifen hängt schließlich von der Aufnahmedauer ab. Diese ist durch mehrere Faktoren beeinflusst und variiert ebenfalls stark. Im Mittel beträgt die Streifenlänge etwa 43 000 Bildzeilen (siehe Abschnitt 4.1.2). Die geometrische Laborkalibrierung der inneren Orientierung der Kamera erfolgte Anfang 1996 (Carsenty et al., 1997). Nachdem die Kamera nach etwa 3 Jahren bereits 1 200 Streifen aufgenommen hatte, wurden 46 davon ausgewählt und verwendet, um durch eine Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung die Parameter der inneren Orientierung für die Zeilen ND, S1 und S2 neu zu bestimmen (Spiegel, 2007). Aktuell werden auch auf Grundlage der Ergebnisse der hier vorliegenden Arbeit Blöcke genutzt, um für alle neun Sensorzeilen neue Parameter der inneren Orientierung zu bestimmen. Zusätzlich zu den neun Sensorzeilen, mit denen die Streifen aufgenommen werden, besitzt die HRSC noch einen CCD Flächensensor; den sogenannten *Super Resouliton Channel* (SRC). Dieser befindet sich hinter einem Teleobjektiv mit einer Brennweite von 975 mm und besteht aus 1 024 x 1 024 Elementen mit einer Größe von jeweils 9 µm x 9 µm (Oberst et al., 2008). Die Aufnahmen des SRC finden in dieser Arbeit keine Verwendung.

2.2.4. Verarbeitung der HRSC-Daten

Aufnahme und Kompression

Um alle Aufnahmen der HRSC in voller Auflösung zur Erde zu übertragen, reicht die zur Verfügung stehende Datenrate zwischen Sonde und den Bodenstationen auf der Erde nicht aus. Aus diesem Grund wird ein Teil der Aufnahmen bereits während der Aufzeichnung komprimiert. Durch Mittelung der ausgelesenen Werte benachbarter Sensorzeilenelemente sowie eine darauf abgestimmte Verlängerung der Integrationszeit entstehen sogenannte *Makropixelformate* (MPF). Die volle Auflösung der Bilder, welche durch die Anzahl der Sensorzeilenelemente festgelegt ist, wird MPF1 genannt. Für die gröberen Makropixelformate MPF2, MPF4 und MPF8 ist die Auflösung um den Faktor 4, 16 bzw. 64 reduziert. Für die meisten Aufnahmen wird nur der Bildstreifen des Nadirkanals im MPF1 aufgenommen, die Stereokanäle dagegen im MPF2 und die Photometrie- und Farbkanäle im MPF4 bzw. MPF8. Welches Format jeweils während der Planung der Aufnahmen gewählt wird, hängt von der festgelegten Aufnahmedauer, der Anzahl der aktivierten Kanäle und der verfügbaren Datenkapazität ab. Zusätzlich wird eine verlustbehaftete Komprimierung mittels einer diskreten Kosinustransformation (DCT) angewandt, die auch für das JPEG-Bildformat verwendet wird. Je höher dabei der ursprüngliche Bildinformationsgehalt ist, desto geringer ist der Kompressionsfaktor. Üblicherweise liegt der Faktor im Bereich von 5 bis 10 (Gwinner et al., 2016).

Übertragung und Empfang

Die erfassten Bildstreifen werden auf der Sonde zwischengespeichert und anschließend von einer für die Übertragung günstigen Position im Orbit zur Erde gesendet. Empfangen werden die Daten durch die drei *Deep Space Antennas* des ESTRACK-Netzwerks (*ESA Tracking Stations*): DSA 1 in Australien, DSA 2 in Spanien und DSA 3 in Argentinien. Von dort werden die Daten an das *European Space Operation Center* (ESOC) in Darmstadt übertragen, von wo aus die *Mars-Express*-Mission betrieben wird. Anschließend erfolgt eine Übertragung an das DLR, welches für die weitere Verarbeitung der HRSC-Aufnahmen zuständig ist.

HRSC-Daten-Level

Die systematische Verarbeitung der HRSC Daten folgt dem Archivierungsplan der *Mars-Express*-Mission (Zender et al., 2009), wobei die Daten mehrere Ebenen, sogenannte *Processing Levels,* durchlaufen:

Der von der Raumsonde gesendete und von den Bodenstationen empfangene Datenstrom wird als **Level-0-Daten** bezeichnet. Nach entsprechender Aufbereitung liegen Rohbilder als **Level-1-Daten** vor. Anhand von Parametern, die durch eine radiometrische Kalibrierung der Kamera bestimmt worden sind, werden diese Rohbilder anschließend korrigiert. Die resultierenden Bilder werden als **Level-2-Daten** bezeichnet und auf den Portalen der NASA und ESA veröffentlicht. Zu jedem Bild werden aus den Orbitinformationen der Sonde Orientierungsdaten abgeleitet. Zusammen mit diesen nominellen Orientierungsdaten werden die Level-2-Bilder in dieser Arbeit als Eingangsdaten verwendet.

Die nächste Ebene bei der Verarbeitung der HRSC-Daten ist eine geometrische Korrektur der Bilder (Scholten et al., 2002). Dabei werden die nominellen Orientierungsdaten und das MOLA-DGM genutzt, um durch eine genäherte Orthoprojektion die **Level-3-Daten** zu erstellen. In Abschnitt 3.2.1 wird dieser Schritt der Vorverarbeitung *Vorentzerrung* genannt. Werden bei der Vorentzerrung nicht die nominellen, sondern bereits durch eine Bündelausgleichung ausgeglichene Orientierungsdaten verwendet, werden sie in dieser Arbeit als **Level-3a-Daten** bezeichnet.

Auch für das Erstellen der **Level-4-Daten** werden aus einer Einzelstreifenausgleichung hervorgegangene Orientierungsdaten verwendet (Gwinner et al., 2010): Zunächst wird aus den Level-3-Bildern und den ausgeglichenen Orientierungsdaten ein HRSC-DGM erstellt. Dieses wird dann genutzt, um aus den Level-2-Bildern ein Orthofoto zu erstellen. Sowohl das DGM als auch das Orthofoto werden gemeinsam pro Streifen als Level-4-Datensatz veröffentlicht. Je nach Qualität und Auflösung der ursprünglichen Daten hat das DGM eine Auflösung von 50 m, 75 m, oder 100 m, und das Orthofoto 12,5 m, 25 m, oder 50 m.

Bei den bislang aufgezählten Daten werden jeweils die Aufnahmen aus einzelnen Orbits verwendet. Es ist jedoch auch möglich die Aufnahmen mehrerer Streifen als Block zu verknüpfen und DGM- und Orthofoto-Mosaike zu erstellen (Dumke et al., 2008). Aus diesem Ansatz gehen die bislang noch nicht veröffentlichten **Level-5-Daten** hervor. Sie werden voraussichtlich Anfang 2020 (Stand Dezember 2019) unter der Bezeichnung *HRSC Mars Chart 30* (HMC30) veröffentlicht (Gwinner et al., 2019). Diese neu eingeführte Verarbeitungsebene definiert offizielle HRSC-Datenprodukte, welche jeweils aus rund 100 Streifen zusammengesetzt sind[3]. Die Einteilung der Streifen (siehe Abschnitt 3.3.2) folgt dabei dem MC-30-Schema (Batson, 1990), welches bereits in ähnlicher Form für die Erstellung sogenannter Quadrangle-DGM vorgeschlagen wurde (Dumke et al. 2010; Michael et al. 2015).

Das in Kapitel 3 vorgestellte Verfahren bildet eine wesentliche Voraussetzung für diesen neuen Datentyp: Die aus der Blockausgleichung resultierenden Orientierungsdaten werden genutzt, um aus mehreren Streifen gemeinsam ein DGM-Mosaik zu erstellen. Bei der Erstellung dieser DGM-Mosaike ergibt sich aus der hohen Passgenauigkeit der Streifen, die durch die Blockausgleichung hergestellt werden konnte, ein weiterer Vorteil: Lücken welchen z.B. durch Wolken oder Sandstürme in einzelnen Streifen auftreten, können gegebenenfalls durch Bildinformation aus anderen Streifen gefüllt werden (Gwinner et al., 2016).

[3] Die Anzahl hängt von der lokalen Abdeckung ab und erhöht sich mit neu hinzukommenden Aufnahmen. Es ist daher vorgesehen, die HMC-Daten bei Bedarf zu aktualisieren

Mit den resultierenden DGM-Mosaiken und den Orientierungsdaten aus der Blockausgleichung werden für jeden Streifen Orthofotos erstellt und diese durch Mosaikierung zu einem Orthofoto-Mosaik zusammengesetzt (Michael et al., 2016). Die Mosaike bilden anschließend die Grundlage für die Erstellung topographischer Karten (Kersten et al., 2018). Abbildung 2.6 zeigt drei dieser Karten. Diese basieren noch auf den Mosaiken eines ersten Prototyps der Halbkachel MC-11-E, welche aus 89 Streifen zusammengesetzt wurde (Gwinner et al., 2015). Der in der Blockausgleichung verwendete Block enthielt ursprünglich 98 Streifen, welche jedoch nicht alle benötigt wurden bzw. nicht verwendet werden konnten. Mit den Datenstand, der in dieser Arbeit verwendet wird (siehe Abschnitt 4.1.2), hat sich die Anzahl der Streifen auf 110 für die Mosaike bzw. 115 für den Block erhöht. Für eine Veröffentlichung der Level-5-Daten in den Archiven der ESA und NASA ist für die farbigen Orthofoto- und die DGM-Mosaike eine Auflösung von 50 m vorgesehen, für das panchromatische Nadirbild-Mosaik 12,5 m. Zusätzlich ist ein durch Pansharpening erzeugtes Farbbild mit ebenfalls 12,5 m Auflösung geplant. Da die HMC30-Mosaike eine Fläche von rund $1330 \times 1780\,\mathrm{km}^2$ überdecken, entstehen sehr große Daten mit $26\,672 \times 35\,564$ bzw. $106\,688 \times 142\,256$ Pixeln. Es ist daher geplant, die Mosaike einer Halbkachel jeweils als 4 bzw. 16 Teilstücke zu veröffentlichen (Gwinner et al., 2019).

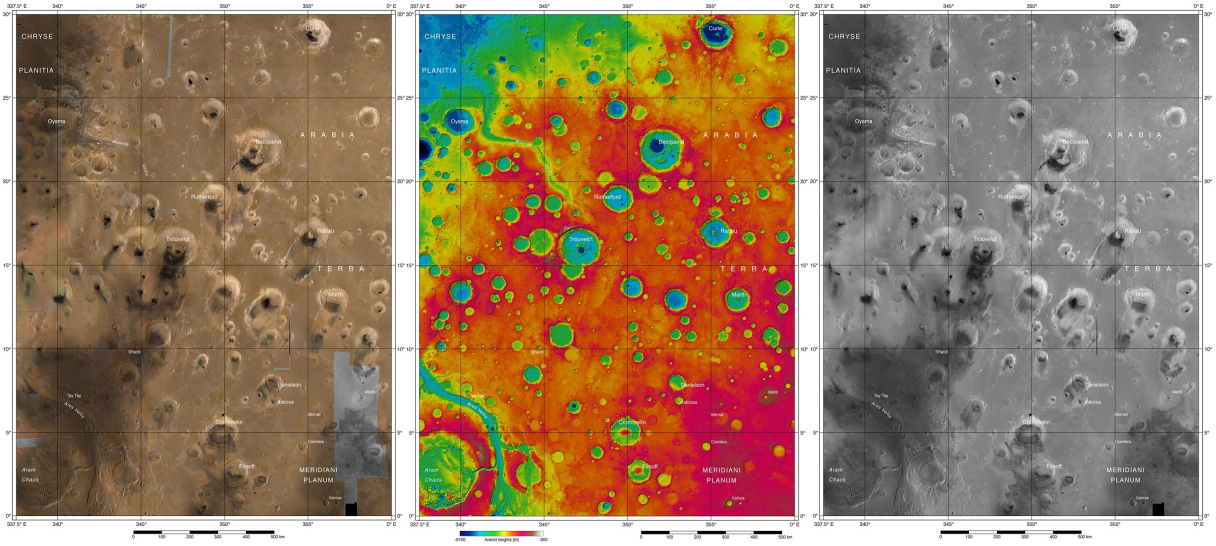


Abbildung 2.6. Mit Aufnahmen der HRSC im Bereich der Halbkachel MC-11-E kartierte Marsoberfläche ($1330 \times 1780\,\mathrm{km}^2$); farbiges Orthofoto-Mosaik (50 m / Pixel), farbcodierte Höheninformation (50 m / Pixel); panchromatisches Orthofoto-Mosaik (12,5 m / Pixel); aus (Gwinner et al., 2016)

3. Methodik

In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur Bündelausgleichung großer Blöcke einer Zeilenkamera vorgestellt. Es wurde für die systematische Verarbeitung der HRSC-Aufnahmen entwickelt und verwendet einen zweistufigen Ansatz. Mit dem vorgestellten Verfahren soll es möglich sein, für alle Bilddaten der HRSC-Mission neue, genauere Orientierungsdaten zu bestimmen. Dazu werden in den Bildern Verknüpfungspunkte bestimmt und diese gemeinsam mit den vorhandenen nominellen Orientierungsdaten sowie dem MOLA-DGM als globales Referenzsystem, als Eingangsdaten in einer Bündelausgleichung verwendet. Die äußere Orientierung der Zeilenkamerabilder muss dabei auf geeignete Weise interpoliert werden. Da die Daten auch als große Blöcke gemeinsam ausgeglichen werden, muss das Verfahren auch rechentechnische Aspekte berücksichtigen.

Im folgenden Abschnitt 3.1 wird zunächst das verwendete mathematische Modell der Bündelausgleichung beschrieben. Bei der Beschreibung des funktionalen und des stochastischen Modells wird auf die vier unterschiedlichen Arten der Beobachtungen eingegangen. Anschließend werden in Abschnitt 3.2 die vier Module vorgestellt, die zur systematischen Bündelausgleichung der HRSC-Daten verwendet werden. Dabei handelt es sich um die Vorverarbeitung, die Verknüpfungspunktbestimmung, die Bündelausgleichung sowie die Evaluierung der Orientierungsdaten. In Abschnitt 3.3 wird der neu entwickelte zweistufige Ansatz zur systematischen Verarbeitung von Blöcken vorgestellt. Dabei wird auch auf den entwickelten Verknüpfungspunktfilter eingegangen.

3.1. Mathematisches Modell der Bündelausgleichung

Die hier beschriebene Bündelausgleichung, die für die Bestimmung der äußeren Orientierung der HRSC-Aufnahmen verwendet wird, basiert auf einer Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell. Die Verwendung einer großen Anzahl an Verknüpfungspunkten führt zu einem stark überbestimmten Gleichungssystem, welches durch eine vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate iterativ gelöst wird. Für diesen Ansatz muss die Aufnahmegeometrie durch ein mathematisches Modell beschrieben werden. Hier wird das Modell der Zentralperspektive verwendet. Die gesuchten Parameter der äußeren Orientierung werden dabei als Unbekannte eingeführt und ausgehend von Näherungswerten geschätzt. Dabei werden über ein stochastisches Modell die Standardabweichungen der Beobachtungen berücksichtigt. Da zur Festlegung des geodätischen Datums weder Passpunkte noch direkt beobachtete Orientierungsdaten mit ausreichender Genauigkeit vorliegen, wird das MOLA-DGM als Passinformation verwendet.

Abbildung 3.1 zeigt schematisch, welche Elemente für die Modellierung der HRSC-Aufnahmegeometrie parametrisiert werden. Dargestellt sind: ein photogrammetrisch aus den HRSC-Bildern bestimmter Punkt P_i; vier Eckpunkte einer darunter liegenden Rasterzelle des MOLA-DGM M_1, M_2, M_3, M_4,; die Höhendifferenz z_{H_i} zwischen dem Punkt und der DGM-Fläche; mehrere mit O markierte Punkte auf der Trajektorie der äußeren Orientierung der Kamera; ein konstanter Bias B und eine zeitabhängige Drift D. Auf eine Darstellung der inneren Orientierung wird verzichtet, da sie hier als bekannt und ihre Parameter in der Ausgleichung als konstant angenommen werden.

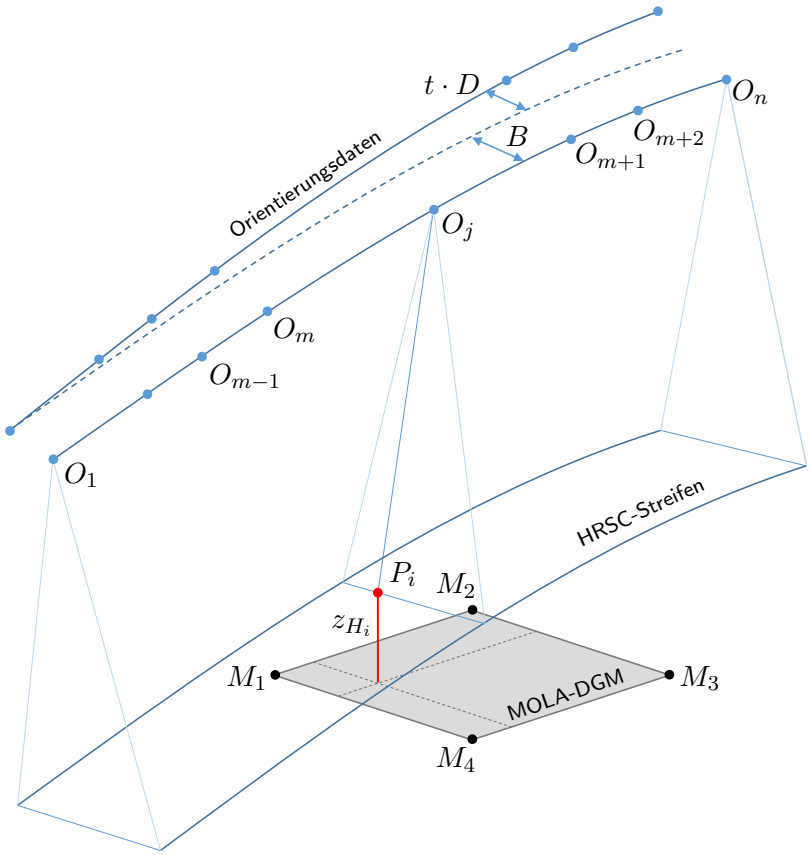


Abbildung 3.1. Modell zur Bündelausgleichung der HRSC-Aufnahmen; Skizziert sind: Orientierungspunkte (O), MOLA-DGM-Punkte (M) mit einer Höhendifferenz z_H, ein photogrammetrischer Punkt (P) sowie Bias (B) und zeitabhängige Drift (D)

Für die Formulierung der Beobachtungsgleichungen werden die unbekannten Parameter des Modells jeweils einer Gruppe **U** zugeordnet. Dabei wird zwischen den folgenden drei Arten von Gruppen unterschieden:

1. Die Position jedes Verknüpfungspunkts P_i im Objektraum wird durch dreidimensionale kartesische Koordinaten X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i} beschrieben:

$$\mathbf{U}_{P_i} = [X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i}] \tag{3.1}$$

2. Sechs Parameter beschreiben jeweils einen Orientierungspunkt O_m: Die Position des Projektionszentrums im Objektraum wird durch die Koordinaten X_{O_m}, Y_{O_m}, Z_{O_m} beschrieben. Die Lage, also die Ausrichtung der Kamera, ist durch die drei Rotationswinkel φ_{O_m}, ω_{O_m}, κ_{O_m} angegeben:

$$\mathbf{U}_{O_m} = [X_{O_m}, Y_{O_m}, Z_{O_m}, \varphi_{O_m}, \omega_{O_m}, \kappa_{O_m}] \tag{3.2}$$

3. Je sechs Parameter pro Streifen s beschreiben systematische Differenzen zwischen den beobachteten Orientierungsdaten und den Orientierungspunkten des Streifens in Form einer konstanten Abweichung (Bias) X_{B_s}, Y_{B_s}, Z_{B_s}, φ_{B_s}, ω_{B_s}, κ_{B_s} und einer zeitabhängigen Abweichung (Drift) X_{D_s}, Y_{D_s}, Z_{D_s}, φ_{D_s}, ω_{D_s}, κ_{D_s}:

$$\mathbf{U}_{BD_s} = [\mathbf{U}_{B_s}, \mathbf{U}_{D_s}] = [X_{B_s}, Y_{B_s}, Z_{B_s}, \varphi_{B_s}, \omega_{B_s}, \kappa_{B_s}, X_{D_s}, Y_{D_s}, Z_{D_s}, \varphi_{D_s}, \omega_{D_s}, \kappa_{D_s}] \tag{3.3}$$

Die Gesamtanzahl der Unbekannten n_U ergibt sich aus der Anzahl der Verknüpfungspunkte n_P und der Anzahl der Orientierungspunkte n_O in allen n_S Streifen eines Blocks, sowie der je sechs Bias- und Drift-Parameter für jeden Streifen. Jeder Verknüpfungspunkt steuert drei, jeder Orientierungspunkt sechs Unbekannte und jeder Streifen zwölf Unbekannte bei:

$$n_U = 3 \cdot n_P + 6 \cdot n_O + 12 \cdot n_S \tag{3.4}$$

3.1.1. Funktionales Modell

Die Verbesserungen $\mathbf{v}$, deren gewichtete Quadratsumme in der Ausgleichung minimiert wird, ergeben sich jeweils aus der Differenz zwischen den Beobachtungen $\mathbf{z}$ und einer Funktion f einer Untermenge der unbekannten Parameter:

$$\mathbf{v} = f(\mathbf{U}) - \mathbf{z} \tag{3.5}$$

Entsprechend der vier unterschiedlichen Beobachtungsgruppen gibt es auch vier Arten dieser Verbesserungsgleichungen:

1. Für ein beobachtetes Paar Bildkoordinaten $\mathbf{z}_{xy} = [x, y]$ gilt folgende Art Verbesserungsgleichung:

$$\mathbf{v}_{xy} = f\left(\mathbf{U}_{P_i}, \mathbf{U}_{O_j}\right) - \mathbf{z}_{xy} \tag{3.6}$$

   Als unbekannte Parameter treten hier die Objektkoordinaten des Verknüpfungspunktes P_i sowie die Parameter der äußeren Orientierung der entsprechenden Bildzeile j auf. Diese werden mittels Interpolation aus den Parametern der benachbarten Orientierungspunkte berechnet (siehe Abschnitt 3.1.2). Die Beobachtungsfunktion f muss für jeden Verknüpfungspunkt individuell gebildet werden. Sie entspricht einer erweiterten (nicht-linearen) Kollinearitätsgleichung mit $p, q = (1, 2, 3)$ für die Elemente $r_{O_j pq}$ der Rotationsmatrix R_{O_j}:

$$\mathrm{v_x} = x_{0_b} - c_b \frac{r_{O_j 11}\left(X_{P_i} - X_{O_j}\right) + r_{O_j 21}\left(Y_{P_i} - Y_{O_j}\right) + r_{O_j 31}\left(Z_{P_i} - Z_{O_j}\right)}{r_{O_j 13}\left(X_{P_i} - X_{O_j}\right) + r_{O_j 23}\left(Y_{P_i} - Y_{O_j}\right) + r_{O_j 33}\left(Z_{P_i} - Z_{O_j}\right)} - x \tag{3.7}$$

$$\mathrm{v_y} = y_{0_b} - c_b \frac{r_{O_j 12}\left(X_{P_i} - X_{O_j}\right) + r_{O_j 22}\left(Y_{P_i} - Y_{O_j}\right) + r_{O_j 32}\left(Z_{P_i} - Z_{O_j}\right)}{r_{O_j 13}\left(X_{P_i} - X_{O_j}\right) + r_{O_j 23}\left(Y_{P_i} - Y_{O_j}\right) + r_{O_j 33}\left(Z_{P_i} - Z_{O_j}\right)} - y \tag{3.8}$$

   Die Parameter der inneren Orientierung c_b, x_{0_b} und y_{0_b} des jeweiligen Bildes b werden als konstant angenommen.

2. Für jede Bildzeile stehen Orientierungsdaten (siehe Abschnitt 3.2.3) als Beobachtungen zur Verfügung. Diese werden an den Orientierungspunkten zur direkten Beobachtung der Unbekannten verwendet. Systematische Differenzen zwischen den Orientierungsdaten und den Orientierungspunkten werden dabei jeweils durch die Parameter für Bias und Drift berücksichtigt. Die Verbesserungsgleichung lautet somit in verallgemeinerter Form:

$$\mathbf{v}_{O_m} = f\left(\mathbf{U}_{O_m}, \mathbf{U}_{BD_s}\right) - \mathbf{z}_{O_m} \tag{3.9}$$

   Ausgeschrieben lautet sie:

$$\mathbf{v}_{O_m} = \mathbf{U}_{O_m} + \mathbf{U}_B + t_m \cdot \mathbf{U}_D - \mathbf{z}_{O_m} \tag{3.10}$$

3. Für Bias und Drift liegen keine beobachteten Daten vor. Zur Regularisierung des Modells, die durch Gewichtung von Pseudobeobachtungen der Form $\mathbf{z}_{BD} = 0$ erreicht wird, werden im stochastischen Modell a priori Standardabweichungen eingeführt. Die Pseudobeobachtungen stehen im direkten linearen Zusammenhang zu ihren entsprechenden Unbekannten. Für ihre Verbesserungen gilt also:

$$\mathbf{v}_{BD} = \mathbf{U}_{BD} - \mathbf{z}_{BD} \tag{3.11}$$

4. Um ein DGM als Passinformation zu verwenden, wird eine Höhendifferenz z_{H_i} als zusätzliche Beobachtung für jeden Verknüpfungspunkt P_i eingeführt. Diese beschreibt die Differenz zwischen der Höhe des Verknüpfungspunktes Z_{P_i} und der von der Lage des Punktes abhängigen DGM-Höhe $Z_M = f\left(X_{P_i}, Y_{P_i}\right)$. Auch hier wird eine Pseudobeobachtung verwendet: $z_{H_i} = 0$. Damit wird die (gewichtete) Bedingung formuliert, dass jeder in den Bildern gemessene Verknüpfungspunkt auf dem beobachteten physikalischen Objekt, in diesem Fall der Marsoberfläche, liegt. Für die Verbesserungen gilt auch hier ein direkter linearer Zusammenhang:

$$v_{H_i} = Z_{P_i} - Z_M - z_{H_i} \tag{3.12}$$

Die Höhe des MOLA-DGM Z_M wird über bilineare Interpolation aus den Höhen Z_{M_q} der vier Eckpunkte der Rasterzelle M_1, M_2, M_3, M_4 berechnet.

$$Z_M(X_{P_i}, Y_{P_i}) = \sum_{q=1}^{4} \left(1 - \frac{X_{P_i} - X_{M_q}}{d}\right) \cdot \left(1 - \frac{Y_{P_i} - Y_{M_q}}{d}\right) \cdot Z_{M_q} \tag{3.13}$$

Die Rasterzellengröße d wird während der Bündelausgleichung iterativ verkleinert (Spiegel, 2007).

3.1.2. Interpolation und Distanz zwischen den Orientierungspunkten

In den Verbesserungsgleichungen der Bildbeobachtungen (3.6) treten die Orientierungsparameter U_{O_j} der jeweiligen Bildzeile auf. Würden diese in der Bündelausgleichung direkt als Unbekannte behandelt, wäre das Gleichungssystem nicht mehr überbestimmt. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Parameter der äußeren Orientierung zu interpolieren. Dieses ist zulässig, da bei einer Kamera auf einem Satelliten davon ausgegangen werden kann, dass sich die Parameter der äußeren Orientierung nicht sprunghaft ändern. Bei der Einzelstreifenausgleichung (siehe Abschnitt 3.3.1) werden zur Interpolation stets mindestens vier Orientierungspunkte verwendet. Im Block (siehe Abschnitt 3.3.5) wird linear zwischen nur zwei Orientierungspunkten interpoliert, von denen einer am Anfang und einer am Ende des Streifens platziert wird. Beide Arten der Interpolation können durch die selbe, unten beschriebene Funktion erfolgen.

In der Regel werden für die Einzelstreifenausgleichung deutlich mehr als vier Orientierungspunkte pro Streifen verwendet. Anstelle eines einzelnen Polynoms höheren Grades, welches zum Überschwingen neigt, wird für die Interpolation ein kubischer Spline verwendet, wobei sich jedes Teilstück auf vier Orientierungspunkte stützt. Die Positionen der Orientierungspunkte O_m werden dazu als Stützstellen verwendet. Der jeweilige Parameter der äußeren Orientierung wird als Stützwert verwendet. Die Parameter der äußeren Orientierung einer Bildzeile U_{O_j} berechnen sich dann jeweils nach Lagrange als Summe aus den gewichteten Parametern der vier benachbarten Orientierungspunkte O_{m-1} ,O_m ,O_{m+1} und O_{m+2}:

$$\mathbf{U}_{O_j} = \sum_{k=m-1}^{m+2} \mathbf{U}_{O_k} \prod_{l=m-1, l\neq k}^{m+2} \frac{t_j - t_l}{t_k - t_l} \tag{3.14}$$

Die Zeitpunkte $t_{m-1} < t_m \leq t_j < t_{m+1} < t_{m+2}$ entsprechen dabei den Positionen der benachbarten Orientierungspunkte. Diese werden jeweils vor der Bündelausgleichung festgelegt. Wie groß dabei jeweils die Distanz zwischen zwei Orientierungspunkten ist, wird von der lokal vorhandenen Anzahl der Verknüpfungspunkte abhängig gemacht. So kann sichergestellt werden, dass sich aus dem Verhältnis zwischen unbekannten Parametern und Beobachtungen in jedem Bereich des Streifens eine ausreichende Redundanz ergibt. In dieser Arbeit wird die Orientierungspunktdistanz (OPD) stets in Sekunden angegeben. Über die Fluggeschwindigkeit der Sonde und die Auslesefrequenz der Kamera ließe sich die Distanz auch in die zurückgelegte Strecke bzw. in Bildzeilen umrechnen.

In dieser Arbeit wird zwischen zwei unterschiedlichen Ansätzen zur Platzierung der Orientierungspunkte unterschieden: Der erste Ansatz verwendet eine konstante Orientierungspunktdistanz (kOPD) und wurde bisher für die HRSC-Daten verwendet (Spiegel, 2007). Der zweite Ansatz verwendet eine variable Orientierungspunktdistanz (vOPD) und wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt (Bostelmann und Heipke, 2014). Für beide Ansätze müssen zuvor OPD_{min} als minimale Distanz zwischen Orientierungspunkten und VP_{min} als minimale Verknüpfungspunktanzahl festgelegt werden. Anschließend wird wie folgt vorgegangen:

1. **kOPD**: Ausgehend vom ersten Orientierungspunkt (OP) werden alle weiteren OP jeweils mit einer konstanten Distanz entsprechend OPD_{min} entlang des Streifens platziert. Anschließend wird in jedem Bereich zwischen zwei OP geprüft, ob die Anzahl der Verknüpfungspunkte dort größer oder gleich VP_{min} ist. Ist dieses nicht der Fall, wird OPD_{min} iterativ um eine bestimmten Wert erhöht, bis überall VP_{min} erreicht wird. Zwischen allen OP besteht dabei konstant immer dieselbe Distanz.

2. **vOPD**: Für jeden OP wird die Distanz zu seinem nächsten Nachbarn individuell bestimmt und kann daher variieren. Der zweite OP wird mit einer Distanz entsprechend OPD_{min} vom ersten OP platziert. Anschließend wird geprüft ob die Anzahl der Verknüpfungspunkte zwischen den beiden OP größer oder gleich VP_{min} ist. Ist dieses nicht der Fall, wird der zweite OP um einen bestimmten Wert verschoben und erneut geprüft bis die Forderung erfüllt ist. Ebenso wird die Position des dritten und aller weiteren OP bestimmt.

3.1.3. Stochastisches Modell

Für die Bündelausgleichung wird davon ausgegangen, dass in den Beobachtungen zwar ursprünglich grobe Fehler enthalten sind, diese aber durch eine iterativ durchgeführte Ausreißersuche erkannt und eliminiert werden können (siehe Abschnitt 3.2.3). Als grobe Fehler gelten dabei z.B. Punktverwechslungen durch die Bildzuordnung in Gebieten mit schwacher Textur, sowie besonders große Werte in den beobachteten Höhendifferenzen, die sich auf Grund von Interpolationsfehlern im MOLA-DGM ergeben können. Außerdem wird jeweils von unkorrelierten Beobachtungen ausgegangen, deren Einfluss auf die Parameter durch die A-priori-Angabe von Standardabweichungen gewichtet wird. In Tabelle 3.1 sind für die entsprechenden Beobachtungsgruppen die Standardabweichungen, die festgelegt werden müssen, aufgelistet:

Vor allem bei den Pseudobeobachtungen für die systematischen Abweichungen und bei den zusätzlichen Beobachtungen für die äußeren Orientierungen kann es sinnvoll sein, die zugehörigen Standardabweichungen auf Null zu setzen. So werden die Beobachtungen in der Ausgleichung als Konstanten behandelt und damit die direkt beobachteten Unbekannten fixiert.

Verknüpfungspunkte:	Bildkoordinaten:	σ_{x,P_i}
		σ_{y,P_i}
Zusätzliche Beobachtungen:	Position:	$\sigma_{[X,Y,Z],O_m}$
	Lage	$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],O_m}$
Systematische Abweichungen:	Bias:	$\sigma_{[X,Y,Z],B_s}$
		$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],B_s}$
	Drift:	$\sigma_{[X,Y,Z],D_s}$
		$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],D_s}$
Passinformation	Höhendifferenzen:	σ_{H,P_i}

Tabelle 3.1. Stochastisches Modell der Bündelausgleichung: A-priori-Standardabweichungen der Beobachtungen

3.2. Systematische Bündelausgleichung der HRSC-Daten

Um die Orientierungsdaten der HRSC-Aufnahmen durch eine Bündelausgleichung systematisch zu bestimmen, wird der in Abbildung 3.2 dargestellte photogrammetrische Prozess verwendet. Er ist in vier Module aufgeteilt: Vorverarbeitung, Verknüpfungspunktbestimmung, Bündelausgleichung und Evaluierung.

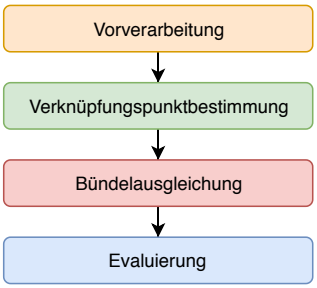


Abbildung 3.2. Ablauf zur Bündelausgleichung der HRSC-Daten; eingeteilt in vier Module

Diese Aufteilung bildet die unterschiedlichen Methoden ab, die jeweils verwendet werden. Im Wesentlichen sind dies: Bildverarbeitung, Bildmessung, Bündelausgleichung und photogrammetrische Punktbestimmung. Auch für die Implementierung und Umsetzung ist diese Aufteilung sinnvoll. Die Anforderungen an Arbeitsspeicher, Prozessorgeschwindigeit und temporären Speicherplatz variieren in den jeweiligen Schritten des photogrammetrischen Gesamtprozesses und müssen für die effiziente Verarbeitung großer Datenmengen berücksichtigt werden (siehe Tabelle 3.2).

	Arbeitspeicher	**Prozessorgeschwindigkeit**	**Temp. Speicher**
Vorverarbeitung:	gering	gering	hoch
Verknüpfungspunktbestimmung:	gering	mittel	mittel
Bündelausgleichung:	hoch	hoch	gering
Evaluierung:	mittel	gering	mittel

Tabelle 3.2. Anforderungen der vier Module an Rechnerressourcen

Die einzelnen Module werden jeweils mehrfach im später beschriebenen Gesamtprozess verwendet. Als Vereinfachung hat jedoch die oben dargestellte Reihenfolge ebenfalls ihre Gültigkeit und wird im Folgenden zur Beschreibung der vier Module beibehalten.

3.2.1. Vorverarbeitung

Die hier verwendete Vorverarbeitung wurde im Zusammenhang mit den Arbeiten zur Bestimmung der Verknüpfungspunkte in den HRSC-Bildern konzeptioniert und detailliert untersucht (Schmidt, 2008). Wie in Abbildung 3.3 dargestellt, kann die Vorverarbeitung in drei Schritte unterteilt werden: Als Eingangsdaten für den Gesamtablauf des Verfahrens (siehe Abbildung 3.8) werden die Level-2-Bilder verwendet. Aufgrund der vorangegangen radiometrischen Korrektur liegen die Bilder im 16-Bit-Format vor. Da die Kamera selbst nur mit 8 Bit aufzeichnet, können die 16-Bit-Bilder mittels *Min-Max-Stretch* nahezu verlustfrei auf 8 Bit komprimiert werden. Anschließend erfolgt eine Tiefpassfilterung der Bilddaten. So können Bildrauschen und Kompressionsartefakte reduziert werden. Es hat sich gezeigt, dass dabei eine einfache 3×3 Pixel große Faltungsmatrix als Näherung eines Gauß-Filters ausreichend ist.

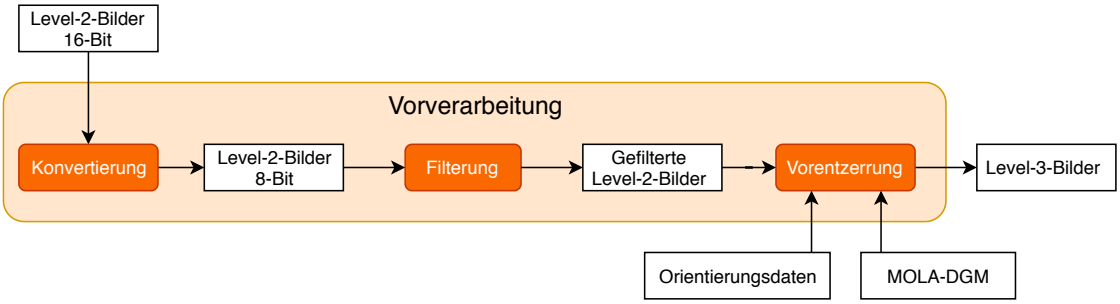


Abbildung 3.3. Ablauf der Vorverarbeitung unterteilt in drei Schritte

Die vorliegenden Bilder weisen starke geometrische Unterschiede auf: Innerhalb eines Streifens führen die lokalen Geländeformen und die Blickrichtungen der Sensorzeilen zu verschieden stark ausgeprägten Reliefversetzungen. Durch die unterschiedlichen MPF entstehen zusätzlich Maßstabsunterschiede (siehe Abschnitt 2.2.4). Zusätzlich kann sich aufgrund des stark elliptischen Orbits von *Mars Express* die Flughöhe innerhalb einer Aufnahme deutlich ändern. Dadurch können sich innerhalb der einzelnen Bildstreifen signifikante Maßstabsunterschiede ergeben. Des Weiteren können bei einer Zeilenkamera durch nicht optimal eingestellte Integrationszeiten nicht-quadratische Pixel entstehen (Scholten et al., 2005). Die Vorentzerrung dient zur Reduktion all dieser Unterschiede. Bei der Vorverarbeitung einzelner Streifen werden das MOLA-DGM und die nominellen Orientierungsdaten verwendet, um die gefilterten Bilder über eine genäherte Orthoprojektion zu entzerren. Die resultierenden, vorläufigen Orthofotos entsprechen damit den Spezifikationen der Level-3-Daten (siehe Abschnitt 2.2.4). Um gemeinsame Verknüpfungspunkte in den Bildern unterschiedlicher Streifen zu bestimmen, werden bei der Vorentzerrung die aus einer Einzelstreifenausgleichung resultierenden Orientierungsdaten (aOD) verwendet (siehe Abbildung 3.8). Dabei können zusätzlich zu den oben aufgezählten geometrischen Unterschieden auch Maßstabs- und Lagedifferenzen zwischen den Streifen reduziert werden. Die resultierenden Bilder werden in dieser Arbeit als Level-3a-Bilder bezeichnet. Die Objektpixelgröße der Orthofotos orientiert sich bei der Vorentzerrung an der *Ground Sampling Distance* (GSD) eines Master-Bildes (siehe Abschnitt 3.2.2). Diese Distanz variiert aufgrund der elliptischen Umlaufbahn innerhalb des Bildstreifens in Abhängigkeit von der jeweiligen Höhe über Grund. Um ein zu starkes *Downsampling* zu vermeiden, wird zunächst jeweils einheitlich der niedrigste Wert zur Vorentzerrung des Bildstreifens bestimmt. Dieser wird als *Best Ground Sampling Distance* bezeichnet. Ohne dafür eine Erklärung gefunden zu haben, hat es sich empirisch als vorteilhaft erwiesen, diesen Wert mit 2 zu multiplizieren, um die GSD des Master-Bildes zu bestimmen (Schmidt, 2008). Somit halbiert sich in den allermeisten Fällen die Auflösung des Nadirbildes, während für die Bilder der anderen Kanäle die Auflösung etwa gleich bleibt bzw. verdoppelt werden muss.

3.2.2. Verknüpfungspunktbestimmung

Die Bestimmung der Verknüpfungspunkte erfolgt in den Level-3-Bildern nach einem Master-Slave-Ansatz (Schmidt, 2008). Als Master-Bild wird dabei stets das Bild des Nadirkanals verwendet. Erfolgt die Bestimmung der Verknüpfungspunkte in Bildern aus mehreren Orbits, wird das Nadirbild eines *primären* Streifens als Master verwendet (siehe Abschnitt 3.3.3). Alle übrigen panchromatischen Bilder werden als Slaves jeweils mit dem Master kombiniert. So entstehen bei der Verknüpfungspunktbestimmung im Einzelstreifen bis zu vier Zuordnungen pro Punkt. In Blöcken sind es entweder bis zu neun oder sogar deutlich mehr, je nachdem welche Teilblockvariante verwendet wird (siehe Abschnitt 3.3.3).

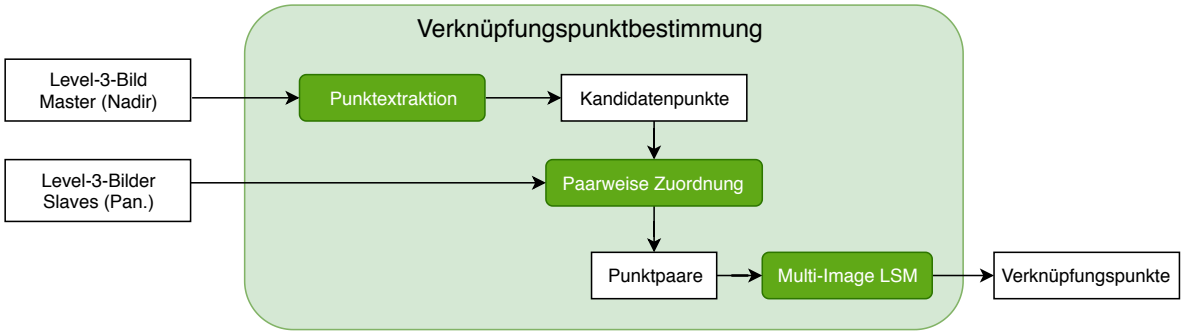


Abbildung 3.4. Ablauf der Verknüpfungspunktbestimmung unterteilt in drei Schritte

Der Ablauf der Verknüpfungspunktbestimmung beginnt mit der Punktextraktion (siehe Abbildung 3.4). In einer regelmäßigen Gitterstruktur werden Kandidaten für die Verknüpfungspunkte im Master-Bild festgelegt. Dass die Punkte stattdessen nicht mit einem Interest-Operator detektiert werden, beruht auf den Ergebnissen empirischer Untersuchungen (Schmidt, 2008). Eine mögliche Erklärung, dass ein regelmäßiges Gitter zu besseren Ergebnissen führt, lautet dabei: Die Aufgabe eines Interest-Operators besteht in der Detektion markanter Bildpunkte, in deren Nachbarschaft sich die Grauwerte stark unterscheiden. Dieses tritt bei den HRSC-Bildern oft dort auf, wo feine Details der Geländeoberfläche abgebildet sind. Diese Details sind im MOLA-DGM aufgrund der geringeren Auflösung nicht immer enthalten. Wenn in der Bündelausgleichung die Höhen an das MOLA-DGM angepasst werden, ergibt sich daraus ein Nachteil. Dieser ergibt sich bei Gitterpunkten nicht.

Die Gitterweite, also der Abstand zwischen den Punkten, wird für die Bestimmung von Verknüpfungspunkten einzelner Streifen in Abhängigkeit von der Länge des Nadirbildes festgelegt. Ihr Einfluss auf die Anzahl möglicher Verknüpfungspunkte, und damit auf die Ergebnisse der Ausgleichung eines Einzelstreifens, wird in Abschnitt 4.2.2 untersucht. Bei Teilblöcken wird die Gitterweite abhängig von der Auflösung des Master-Bildes gewählt.

Für die paarweise Bildzuordnung findet eine normierte Kreuzkorrelation Anwendung. Durch die Normierung werden die teils starken, radiometrischen Unterschiede in den Bildern berücksichtigt. Die Bildausschnitte zur Berechnung der Kreuzkorrelationskoeffizienten können dabei relativ groß gewählt werden, da durch die Vorentzerrung kaum noch perspektivische Unterschiede vorhanden sind. Große Bildausschnitte sind außerdem sinnvoll, da die Marsoberfläche oft nur geringe Textur in den Bildern erzeugt; rechentechnisch sind sie handhabbar, da der Suchraum aufgrund der Vorentzerrung und der Verwendung von Bildpyramiden relativ klein gewählt werden kann.

Im letzten Schritt der Verknüpfungspunktbestimmung werden die paarweisen Zuordnungen über ein Multi-Image Least-Squares-Matching (MI-LSM) nach Krupnik (1994) verknüpft. Dadurch wird die Konsistenz der Koordinatentupel sichergestellt und eine Genauigkeitssteigerung der Bildkoordinaten erreicht. Für Einzelstreifen ergeben sich somit für jeden Verknüpfungspunkt bis zu fünf Bildpunkte; für Blöcke hängt die maximal resultierende Anzahl an Bildbeobachtungen pro Verknüpfungspunkt von der Anzahl der in diesem Bereich überlappenden Bilder ab und kann deutlich höher ausfallen.

3.2.3. Bündelausgleichung

Die ermittelten Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte werden als Beobachtungen für die in Abschnitt 3.1 beschriebene Bündelausgleichung verwendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass in den Koordinaten grobe Fehler, z.B. Punktverwechslungen, enthalten sein können. Außerdem kann es vorkommen, dass sich für einige Verknüpfungspunkte sehr große Höhendifferenzen zum teils stark interpolierten MOLA-DGM ergeben. Beides kann das Ergebnis der Bündelausgleichung negativ beeinflussen. Aus diesem Grund wird in beiden Stufen des Ablaufs (Streifen- und Blockausgleichung) jeweils eine robuste Bündelausgleichung durchgeführt, um entsprechende Beobachtungen zu eliminieren. Bei der Ausgleichung einzelner Streifen (SBA) gibt es zwei Schritte. Die Bündelausgleichung von Blöcken (BBA) erfordert vier Schritte. Dieses Konzept basiert auf vorigen Arbeiten und wird dort ausführlicher beschrieben (Spiegel, 2007). Dazu ergänzend ist der Ablauf hier in Abbildung 3.5 grafisch dargestellt und zusammenfassend erläutert.

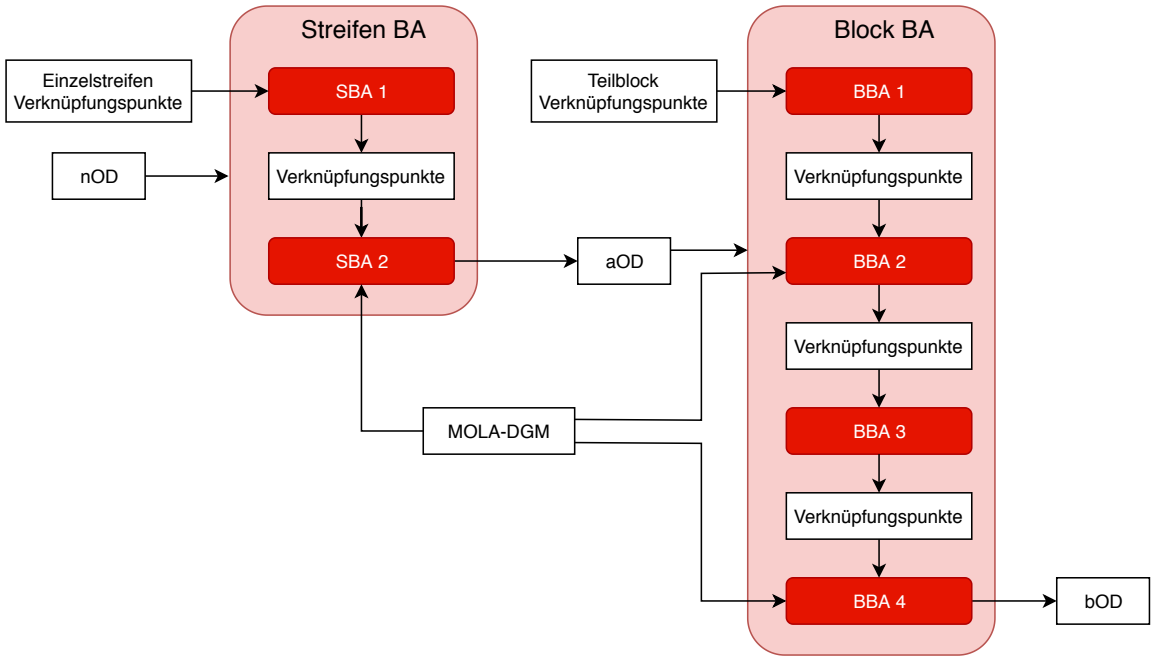


Abbildung 3.5. Ablauf der zweistufigen Bündelausgleichung (BA); 1. Stufe: Einzelstreifenausgleichung (SBA); 2. Stufe Blockausgleichung (BBA); nominelle Orientierungsdaten (nOD) als Eingangsdaten; ausgeglichene (aOD) als Zwischenergebnis; blockausgeglichene (bOD) als Endergebnis

Jeweils im ersten Schritt (SBA 1, BBA 1) werden grobe Fehler anhand der Residuen der Bildkoordinaten gesucht. Im zweiten Schritt (SBA 2, BBA 2) erfolgt die Suche jeweils in den Höhendifferenzen zwischen HRSC-Punkten und dem MOLA-DGM. Die zwei weiteren Schritte (BBA 3 und BBA 4) der Blockausgleichung dienen der Grobfehlersuche in den Beobachtungen von Punkten sich überlappender Streifen, auch hierbei zunächst anhand der Residuen der Bildkoordinaten (BBA 3) und anschließend anhand der Höhendifferenzen (BBA 4).

In jedem Schritt werden mehrere Durchläufe der Ausgleichung gerechnet und jeweils im Anschluss die Punkte mit den größten Residuen entfernt. Die schließlich verbleibenden Punkte werden, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, für den jeweils nächsten Schritt verwendet. In den Schritten SBA 2, BBA 2 und BBA 4 wird das MOLA-DGM zur Bestimmung der Höhendifferenzen benötigt. Die nominellen Orientierungsdaten (nOD) werden als Eingangsdaten für beide Schritte der Ausgleichung einzelner Streifen verwendet. Die aus dem zweiten Schritt (SBA 2) resultierenden Orientierungsdaten (aOD) dienen der Blockausgleichung jeweils als Eingangsdaten. Das Ergebnis der Blockausgleichung sind die aus dem vierten Schritt resultieren Orientierungsdaten (bOD).

3.2.4. Evaluierung der Orientierungsdaten

Das Ergebnis der Bündelausgleichung, sei es als Einzelstreifen oder als Block, sind neue Orientierungsdaten für die jeweiligen HRSC-Streifen. Die Qualität dieser Orientierungsdaten bestimmt wesentlich die Ergebnisse aller weiteren Verarbeitungsschritte, wie z.B. die Objektpunktbestimmung zur DGM-Erstellung. Aus diesem Grund wird für die systematische Verarbeitung der HRSC-Daten nach jeder Bündelausgleichung eine Evaluierung durchgeführt. Dabei werden die neuen Orientierungsdaten, die aus der Einzelstreifen- oder Blockausgleichung resultieren, jeweils mit den nominellen Orientierungsdaten und untereinander verglichen. In Abbildung 3.6 ist dieses Konzept grafisch dargestellt.

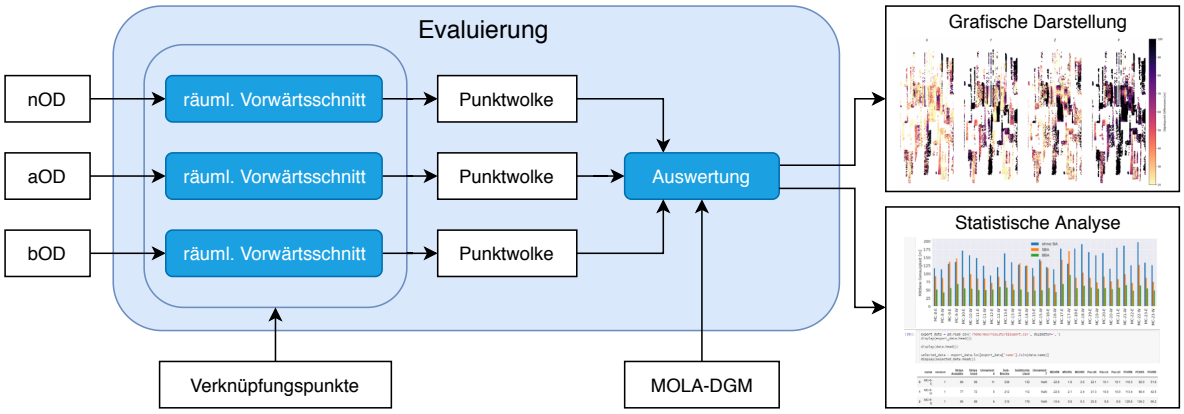


Abbildung 3.6. Evaluierung der Orientierungsdaten: Vergleich zwischen nominellen (nOD), ausgeglichenen (aOD) und blockausgeglichenen (bOD) Orientierungsdaten

Die für diese Evaluierung verwendeten, homologen Punkte werden, ebenso wie die Verknüpfungspunkte für die Bündelausgleichung, mit dem in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Ansatz in den Level-3-Bildern bestimmt. Dabei wird eine geringere Gitterweite gewählt, sodass eine deutlich größere Anzahl an Punkten resultiert. Mit der jeweils vorliegenden Variante der Orientierungsdaten (nOD = nominell, aOD = ausgeglichen, bOD = blockausgeglichen) werden aus den Bildkoordinaten dieser Verknüpfungspunkte die 3D-Koordinaten von Objektpunkten berechnet. Die Berechnung dieser Objektkoordinaten (X_i, Y_i, Z_i) für einen Punkt P_i erfolgt dabei über eine Ausgleichung mit den Koordinaten von mindestens drei Bildpunkten als Beobachtungen.

Aus den Elementen der Kofaktormatrix der Unbekannten (q_{XX}, q_{YY}, q_{ZZ}) können für jede Koordinatenrichtung die Standardabweichungen angegeben werden:

$$s_X = s_0\sqrt{q_{XX}}$$
$$s_Y = s_0\sqrt{q_{YY}}$$
$$s_Z = s_0\sqrt{q_{ZZ}}$$

Aus diesen Standardabweichungen kann nun der Helmertsche Punktfehler $s_{P_i}^H$ berechnet werden:

$$s_{P_i}^H = \sqrt{s_{X_i}^2 + s_{Y_i}^2 + s_{Z_i}^2}$$

Im Folgenden wird dieser mittlere Punktfehler als Vorwärtsschnittfehler bezeichnet und mit **VSF** abgekürzt. Beim Vergleich unterschiedlicher Orientierungsdaten (nOD, aOD, bOD) wird durch einen angehängten Buchstaben entsprechend markiert, welcher Datensatz verwendet wurde (VSFn, VFSa, VSFb). Die Werte werden zur Beschreibung der Präzision der 3D-Koordinaten der HRSC-Objektpunkte verwendet. Für einige Analysen der Ergebnisse kann es sinnvoll sein, bei der Genauigkeitsbeurteilung zwischen Lage und Höhe bzw. den drei Koordinatenrichtungen zu unterscheiden. In dieser Arbeit ist diese Unterscheidung nicht notwendig, weshalb zugunsten der Übersichtlichkeit darauf verzichtet wird.

Um die absolute Position der HRSC-Punkte zu beurteilen, stehen die Höhen H_{MOLA} des MOLA-DGM im Rasterformat MEGDR (siehe Abschnitt 2.2.1) zur Verfügung. Diese werden genutzt um zu jeder Höhe H_{HRSC} der HRSC-Punkte eine Höhendifferenz H_{Diff} zu berechnen:

$$H_{Diff} = H_{HRSC} - H_{MOLA}$$

Bei der Evaluierung der Orientierungsdaten wird diese Differenz mit **MDiff** abgekürzt. Einzeln sind die Höhendifferenzen aufgrund des großen Auflösungsunterschieds zwischen dem MOLA-DGM und der HRSC-Punktwolke als Qualitätsmaß wenig aussagekräftig. Erst durch die große Anzahl verwendeter Punkte lässt sich mit den MDiff-Werten die Passgenauigkeit der HRSC-Daten zum MOLA-DGM statistisch evaluieren (Heipke et al., 2007). Bei der systematischen Verarbeitung der Daten ergeben sich nun für jeden HRSC-Streifen Punktwolken, in denen jeweils, neben einer Punktnummer und den Objektkoordinaten auch der VSF-Wert als Maß für die Präzision und der MDiff-Wert als Maß für die Passgenauigkeit zum MOLA-DGM angegeben sind.

Bei der Evaluierung von Blöcken werden die Punktwolken mehrerer Streifen kombiniert und anschließend gemeinsam ausgewertet. Zusätzlich sind bei der Evaluierung von Blockausgleichungsergebnissen die Verknüpfungspunkte entscheidend, die in zwei Streifen gleichzeitig beobachtet wurden. Die Bildbeobachtungen dieser Punkte bilden den selben Geländepunkt der Oberfläche ab und werden in der Blockausgleichung als ein Punkt mit drei Koordinaten zur Beschreibung seiner Position behandelt. Für die Evaluierung werden die Bildkoordinaten jedoch verwendet, um zwei separate Objektpunkte zu berechnen: Dazu werden jeweils die Bildbeobachtungen für beide Streifen unabhängig voneinander genutzt. Liegen jeweils mehr als drei Bildpunkte vor, werden daraus die Objektkoordinaten der zwei Punkte berechnet. Aus den Koordinatendifferenzen (in X-, Y-, Z-Richtung) kann die Raumstrecke als Distanz zwischen diesen beiden Objektpunkten berechnet und so die lokale Passgenauigkeit der beiden Streifen zueinander beschrieben werden. Dieses dritte, nur in der Blockausgleichung verfügbare Qualitätsmaß, wird im Folgenden mit **PDiff** bezeichnet und ist von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Ergebnisse in Abschnitt 4.3. Abbildung 3.7 stellt die drei verwendeten Qualitätsmaße in grafischer Form dar:

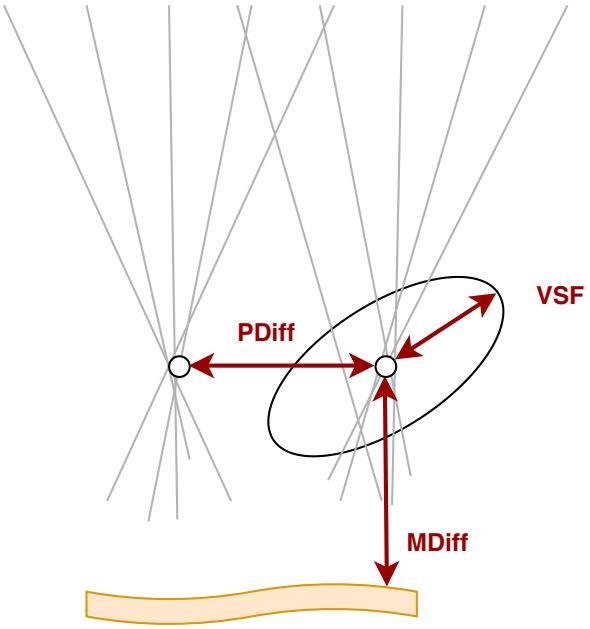


Abbildung 3.7. Qualitätsmaße zur Beurteilung der Objektpunktgenauigkeit

Die erzeugten Punktwolken mit ihren Qualitätsmaßen können statistisch oder graphisch analysiert werden (Abbildung 3.6). Lokale Auffälligkeiten können durch farbcodierte Darstellungen der Punktwolken aufgedeckt werden. Systematische Abweichungen für gesamte Streifen oder Blöcke werden z.B. durch Mittelwerte besser aufgedeckt. Für die Analyse großer Datenreihen sind diese quantitativen Einzelwerte oft ebenfalls deutlich besser geeignet als graphische Darstellungen der Punktwolken. In dieser Arbeit werden die Mittelwerte jeweils durch ein kleines „m“ gekennzeichnet (mVSF, mMDiff, mPDiff). Die drei Maße sind jeweils in Metern angegeben. Für die Auswertung einzelner Streifen wäre eine Angabe bezogen auf die Objektpixelgröße bzw. das *Instantaneous Field of View* (IFOV) eine sinnvolle Alternative (Gwinner et al., 2010). Der Fokus dieser Arbeit liegt aber auf der Auswertung von Blöcken, aus welchen Mosaike mit homogener Auflösung und möglichst auch homogen verteilter Genauigkeit erstellt werden sollen. Absolute, metrische Angaben sind dabei besser geeignet, mögliche Inhomogenitäten im Block abzubilden. Bei der Bewertung der Ergebnisse werden die Werte letztlich vor allem im Vergleich zwischen unterschiedlichen Orientierungsdaten (nOD, aOD, bOD) und zur Analyse lokaler Systematiken verwendet, wobei es weniger auf die absoluten Zahlen ankommt.

Da sich bei den Berechnungen weder die verwendeten Bildpunktkoordinaten noch sonstige Parameter ändern, kann eine Veränderung der Evaluierungsergebnisse ausschließlich auf die jeweiligen Orientierungsdaten zurückgeführt werden. Die Ergebnisse der Evaluierung können also genutzt werden, um:

1. Eine mögliche Verbesserung der Orientierungsdaten anzugeben und damit die Notwendigkeit der Bündelausgleichung zu beurteilen.

2. Den Einfluss von Stellgrößen auf die Bündelausgleichung zu beurteilen.

3. Bei der Auswahl von Streifen oder Teilblöcken zu entscheiden, ob einzelne Datensätze von der Blockausgleichung ausgeschlossen werden sollen.

3.3. Zweistufige Bündelausgleichung von Zeilenkamera-Blöcken

Ein Alleinstellungsmerkmal der HRSC-Mission sind Bilddaten, die inzwischen für den gesamten Mars nahezu flächendeckend vorliegen und aus denen sich für jeden Streifen 3D-Information ableiten lässt. Da sich mittlerweile jeder Streifen mit anderen Streifen überlappt, können überall photogrammetrische Blöcke gebildet und somit systematisch großflächige DGM- und Orthofoto-Mosaike erstellt werden. Um diese großen HRSC-Blöcke effizient verarbeiten zu können, wurde für diese Arbeit das in Abbildung 3.8 dargestellte zweistufige Verfahren entwickelt. Dabei werden die vier oben beschriebenen Module (Vorverarbeitung, Verknüpfungspunktbestimmung, Bündelausgleichung und Evaluierung) sowie der neu entwickelte Verknüpfungspunktfilter (siehe Abschnitt 3.3.4) verwendet.

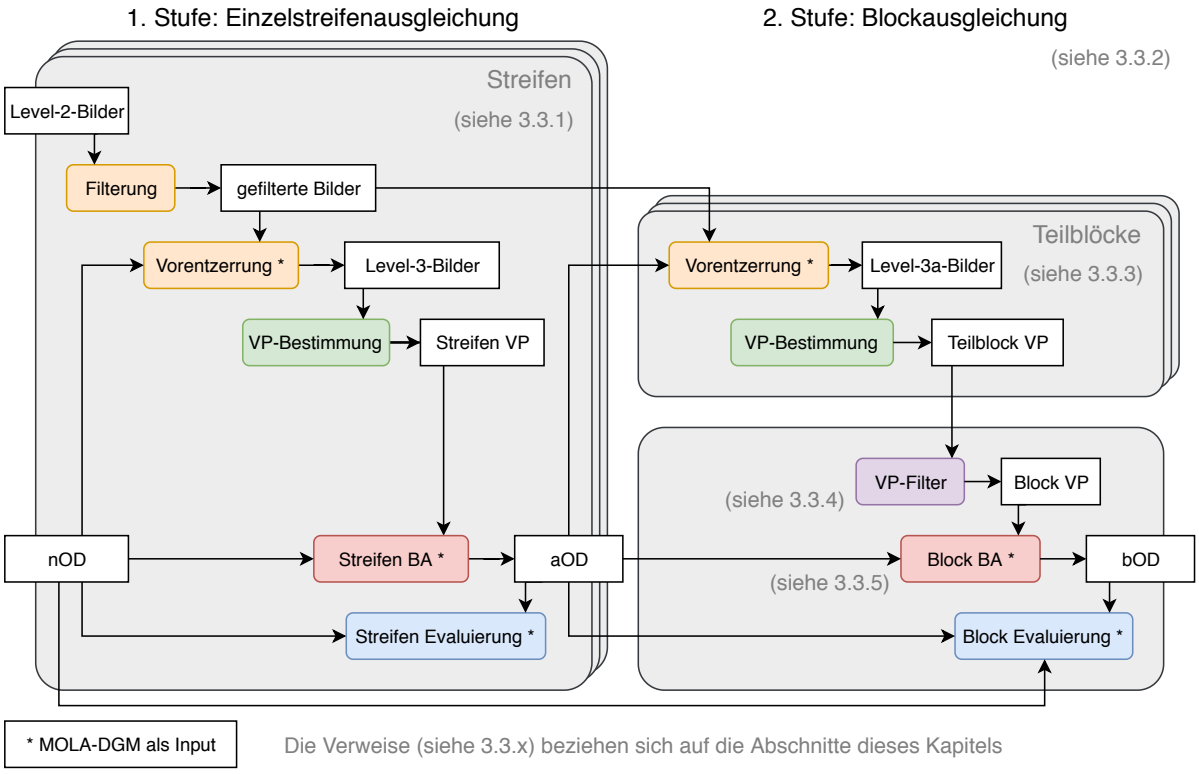


Abbildung 3.8. Photogrammetrische Prozesskette zur zweistufigen Bündelausgleichung großer HRSC-Blöcke

In der ersten Stufe des Verfahrens (links in Abbildung 3.8) ist der Ablauf der Verarbeitung einzelner HRSC-Streifen dargestellt. Dieser Teil der Prozesskette kann für jeden Streifen einzeln und unabhängig von anderen Streifen durchgeführt werden. Er lässt sich daher parallel durchführen. Das Ergebnis sind die durch die Bündelausgleichung optimierten Orientierungsdaten der Einzelstreifen (**aOD**). Diese können zur Herstellung von Level-4-Daten (siehe Abschnitt 2.2.4) verwendet werden, da sie zur Erstellung von DGM mit hoher Punktgenauigkeit und guter Anpassung an das MOLA-DGM geeignet sind (Gwinner et al., 2010).

In der zweiten Stufe des Verfahrens (rechts in Abbildung 3.8) werden die Streifen zu Blöcken verbunden und ihre Position auch relativ zueinander optimiert. Wie in der ersten Stufe wird das MOLA-DGM dabei als Referenz verwendet. Für die Bestimmung der Verknüpfungspunkte werden Teilblöcke gebildet (siehe Abschnitt 3.3.3). Diese werden jeweils separat verarbeitet (rechts oben in Abb. 3.8), sodass auch dieser Teil des Ablaufs parallel abgearbeitet werden kann. Vor der gemeinsamen Bündelausgleichung aller Streifen des Blocks erfolgt eine Filterung der Verknüpfungspunkte (siehe Abschnitt 3.3.4). Eine wesentliche Anforderung an die zweite Stufe des Verfahrens ist, eine Steigerung der gegenseitigen

Passgenauigkeit der Streifen zu erreichen, ohne dabei die in der ersten Stufe erzielte Objektpunktgenauigkeit und die Anpassung an das MOLA-DGM signifikant zu verschlechtern. Das Gesamtergebnis des zweistufigen Verfahrens sind als Block optimierte Orientierungsdaten (**bOD**) für jeden Streifen des Blocks. Diese werden zur Erstellung der Level-5-Daten (DGM- und Orthofoto-Mosaike) verwendet (siehe Abschnitt 2.2.4).

3.3.1. Einzelstreifenausgleichung

Eingangsdaten für die Verarbeitung der Einzelstreifen im Block sind die panchromatischen HRSC--Bildstreifen im Level-2-Format, die dazugehörigen nominellen Orientierungsdaten (nOD) sowie das MOLA-DGM (siehe ganz links in Abbildung 3.8). Die in der Vorverarbeitung (siehe Abschnitt 3.2.1) als Zwischenergebnis anfallenden, gefilterten Bilder werden gespeichert, um sie anschließend in den Teilblöcken erneut zu verwenden. Mit dem MOLA-DGM und den nOD werden vorläufige Orthofotos (Level-3-Bilder) berechnet, in welchen die Verknüpfungspunktbestimmung erfolgt. Die daraus resultierenden Verknüpfungspunkte werden für die jeweilige Bündelausgleichung der Streifen verwendet.

Aus den nOD werden in der Ausgleichung die Beobachtungen $\mathbf{z}_{O_m}$ für die äußere Orientierung an den Orientierungspunkten abgeleitet (siehe Abschnitt 3.1). Dabei erfolgt eine Umrechnung von einem globalen (kartesischen, areozentrischen) Koordinatensystem in ein lokales, kartesisches Tangentialsystem. Um mögliche Interpolationsfehler zwischen den Orientierungsdaten und der in der Ausgleichung interpolierten äußeren Orientierung zu vermeiden, werden außerdem Differenzen für die Orientierung jeder einzelnen Bildzeile bestimmt und als konstante Werte in der Ausgleichung mitgeführt (Müller 1991, Spiegel 2007). Aufgrund der physikalischen Eigenschaften einer Satellitenbahn werden die Parameter zur Beschreibung der Positionen innerhalb eines Streifens als konstant angenommen, indem ihre direkten Beobachtungen mit der Standardabweichung $\sigma_{[X,Y,Z],O_m} = 0$ gewichtet werden. Die Lagewinkel der äußeren Orientierung dagegen werden als Unbekannte mit einer Unsicherheit entsprechend den Standardabweichungen ihrer direkten Beobachtungen $\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],O_m}$ betrachtet.

Um für den gesamten Orbit eine Verschiebung, modelliert als Bias der beobachteten Orientierungsdaten in alle drei Koordinatenrichtungen, sowie eine Verdrehung des Orbits als Drift in Z-Richtung modellieren zu können, werden die Standardabweichungen der jeweiligen Pseudobeobachtungen entsprechend groß gewählt. Die robuste Einzelstreifenausgleichung erfolgt in zwei Schritten (siehe Abschnitt 3.2.3), wobei die Bündelausgleichung mit einer möglichst großen, von den verfügbaren Verknüpfungspunkten abhängigen Anzahl an Orientierungspunkten durchgeführt (siehe Abschnitt 3.1.2) wird. Dadurch können die Winkel der äußeren Orientierung entsprechend detailliert entlang des Satellitenbahnabschnitts rekonstruiert werden.

Aus den in der Ausgleichung geschätzten Parametern der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten werden durch Interpolation innerhalb des Moduls der Bündelausgleichung die aOD für jeden Bildstreifen berechnet. Diese werden evaluiert, indem sie mit den nOD bezüglich VSF und MDiff verglichen werden (siehe Abschnitt 3.2.4). Anschließend werden die aOD als Eingangsdaten für die zweite Stufe des Verfahrens verwendet: Zunächst werden sie genutzt, um durch eine Vorentzerrung die Level-3a-Bilder zu erstellen. Anschließend werden die aOD als Beobachtungen für die äußere Orientierung der Orientierungspunkte für die Bündelausgleichung des gesamten Blocks verwendet. Wie auch bereits in der Einzelstreifenausgleichung werden dabei konstante Differenzen für die Bildzeilen bestimmt. Die in der Einzelstreifenausgleichung mit hoher Frequenz rekonstruierten Winkel werden somit während der Blockausgleichung, in der für jeden Streifen nur zwei Orientierungspunkte verwendet werden, beibehalten. Dieser Ansatz ist ein wichtiger Beitrag zur effizienten Ausgleichung der HRSC-Daten. Es ist dadurch möglich, auch in großen Blöcken die Orbitgeometrie für jeden HRSC-Streifen sehr detailliert zu rekonstruieren, ohne ein zu großes Gleichungssystem lösen zu müssen.

3.3.2. Konzept der Blockbildung

Die zweite Stufe des Verfahrens (siehe rechts in Abbildung 3.8) dient der Blockausgleichung. Ihr Ziel ist es, die Position der Streifen relativ zueinander zu optimieren. Dabei soll gewährleistet werden, dass sich die zuvor in der Einzelstreifenausgleichung erreichte Qualität der Orientierungsdaten nicht verschlechtert. Für die systematische Kartierung der Marsoberfläche mit HRSC-Mosaiken, wird von der *Global Topography and Mosaic Generation Task Group* (GTMTG) des HRSC-Teams das vom USGS eingeführte MC-30-Schema verwendet (Gwinner et al., 2016).

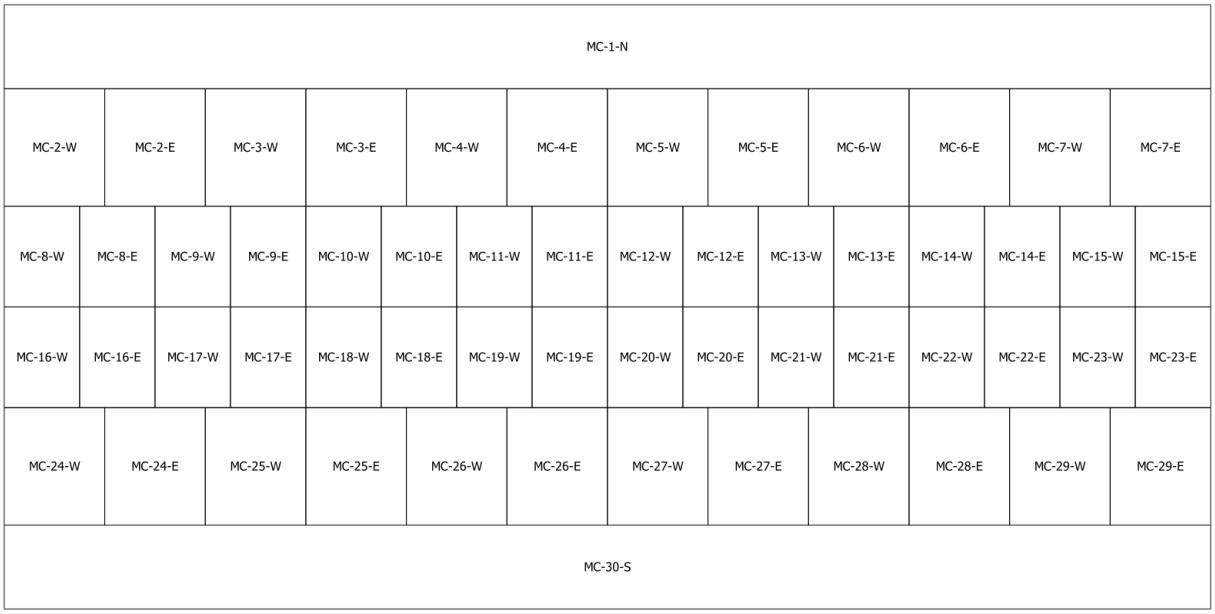


Abbildung 3.9. *Mars Chart 30* (MC-30) Kacheln nach Batson (1990) jeweils in eine Ost- (E) und West-Hälfte (W) geteilt (Ausnahmen: MC-1 und MC-30)

Mit Ausnahme der beiden Pol-Kacheln, wird jede Kachel in jeweils zwei Teile geteilt (siehe Abbildung 3.9). Durch Überlagerung dieser Halbkacheln werden die HRSC-Daten anhand ihrer Footprints eingeteilt (siehe Abbildung 3.10). Durch diese Einteilung ergeben sich Blöcke mit jeweils rund 90 HRSC-Streifen, was aus praktischer Sicht eine Größenordnung ist, mit der aktuell verfügbare Rechner trotz der hohen Auflösung der Daten umgehen können.

Neben der systematischen Bereitstellung von Blöcken dieser Größe, kann das hier beschriebene Verfahren auch auf kleinere Blöcke mit anderen Auswahlkriterien angewendet werden. Um z.B. für zukünftige Missionen Kontextkarten für potentielle Landestellen zu erstellen, sind als Block ausgeglichene HRSC-Daten hervorragend geeignet (Golombek et al., 2017). Abhängig von Größe, Form und Lage der Streifen im Block, bestehen zwischen den Streifen Überlappungen (siehe Abbildung 3.11), die genutzt werden, um dort streifenübergreifende Verknüpfungspunkte zu bestimmen. Es wird dabei angenommen, dass die vorliegenden geometrischen Informationen über die Footprints ausreichend genau sind, um alle relevanten Überlappungsbereiche zu erfassen. Überlappungsbereiche, die aufgrund ungenauer Footprints nicht erfasst werden, sind nur sehr klein, sodass ihr Einfluss auf das Ergebnis der Blockausgleichung als gering betrachtet werden kann.

In Tabelle 3.3 sind die Anzahl an Streifen und die sich daraus ergebende Anzahl an Überlappungen exemplarisch für die drei Beispielblöcke aus Abbildung 3.11 gegenübergestellt. Wie sich aus den Überlappungen die zwei Varianten der Teilblöcke ergeben, deren Anzahl ebenfalls mit angegeben ist, wird im folgenden Abschnitt behandelt.

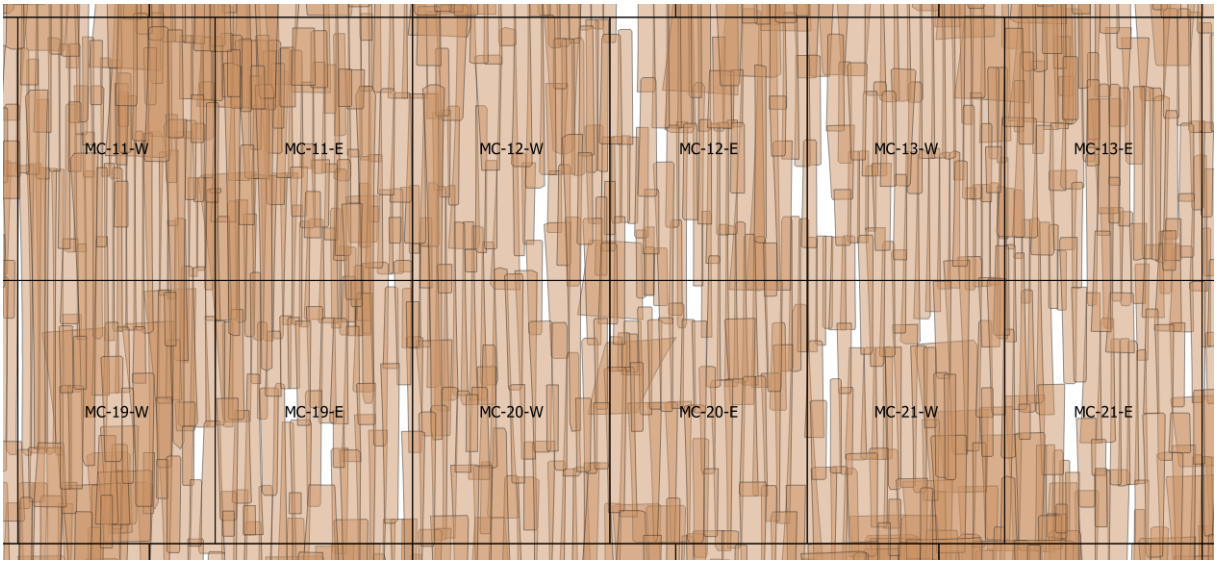


Abbildung 3.10. Zur Blockbildung überlagerte Footprints der HRSC-Streifen mit 12 der 58 MC-30-Halbkacheln

	HRSC-Streifen	Überlappungen	P-Teilblöcke	M-Teilblöcke
kleiner Block:	4	5	10	4
mittelgroßer Block:	39	147	294	39
großer Block:	115	547	1 094	115

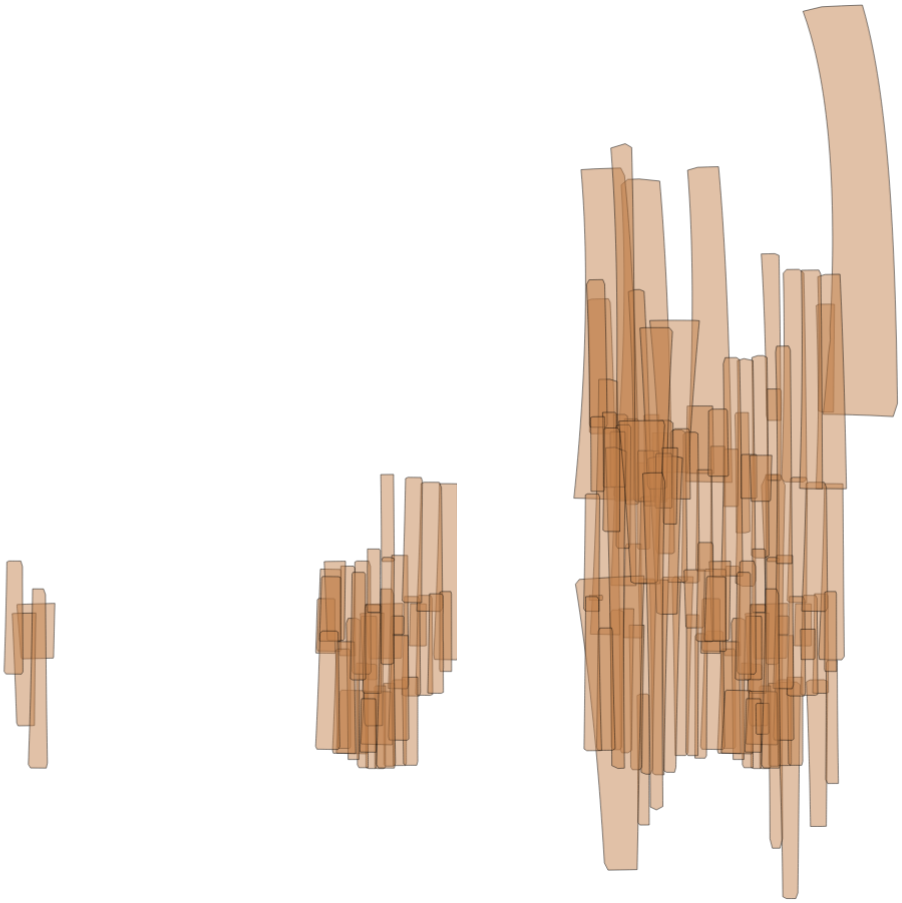
Tabelle 3.3. Vergleich unterschiedlich großer HRSC-Blöcke

3.3.3. Teilblock-Strategie zur Verknüpfungspunktbestimmung

Um die Verknüpfungspunkte für die Blockausgleichung zu bestimmen, wird der Block in Teilblöcke aufgeteilt. Die nachfolgende Blockausgleichung nutzt dann die Vereinigungsmenge der Verknüpfungspunkte aller Teilblöcke als Eingangsdaten, wobei diese Menge vorher noch durch den Verknüpfungspunktfilter ausgedünnt wird (siehe Abschnitt 3.3.4). In dieser Arbeit wird dabei zwischen zwei Varianten von Teilblöcken unterschieden: Paare, bestehend aus jeweils einem Primär- und einem Sekundärstreifen, werden als **P-Teilblöcke** bezeichnet. Mehr-Streifen-Teilblöcke mit einem Primärstreifen und mehreren Sekundärstreifen, werden als **M-Teilblöcke** abgekürzt. Dieses Konzept ist eine Verallgemeinerung des von Schmidt (2008) verwendeten Ansatzes, welcher nur für kleine Blöcke mit einfacher Struktur geeignet ist.

Am Beispiel eines kleinen Blocks (siehe Abbildung 3.11) werden diese zwei neuen Konzepte hier gegenübergestellt und in Abschnitt 4.3.2 experimentell verglichen. Abbildung 3.12 zeigt die Footprints der Nadirbilder der vier HRSC-Streifen. Zur Veranschaulichung ist jeder Streifen mit einem Buchstaben gekennzeichnet (A, B, C, D). Aus den Überlappungen der Streifen ergibt sich der ebenfalls dort dargestellte ungerichtete Überlappungsgraph, welcher verdeutlicht, dass für diesen kleinen Block lediglich die Überlappung zwischen A und C fehlt.

Als erste Variante wird der Block nun in P-Teilblöcke aufgeteilt, sodass sich für jede der fünf Kanten des Überlappungsgraphen zwei Teilblöcke ergeben, in denen beide Streifen jeweils einmal als Primärstreifen verwendet werden. Der Grund dafür ist folgender: Für die Anpassung an das MOLA-DGM in der Blockausgleichung werden gut verteilte Verknüpfungspunkte im gesamten Gebiet des Blocks und nicht nur in den Überlappungsbereichen benötigt. Durch die bidirektionale Strategie ist dieses



kleiner Block: 4 Streifen | mittelgroßer Block: 39 Streifen | großer Block: 115 Streifen

Abbildung 3.11. Beispiele für photogrammetrische Blöcke unterschiedlicher Größe; gebildet und dargestellt anhand der Footprints der HRSC-Streifen

sichergestellt, da jeder Streifen mindestens einmal Primärstreifen ist und somit das Master-Bild stellt, für dessen gesamtes Gebiet die Kandidaten für die Verknüpfungspunkte angelegt werden. Durch diese Redundanz werden mehr Verknüpfungspunkte erzeugt als benötigt. Dieses wird vor der Ausgleichung durch den in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Verknüpfungspunktfilter kompensiert.

In Abbildung 3.13 sind die zehn P-Teilblöcke des Beispielblocks dargestellt, wobei der Primärstreifen jeweils blau, der Sekundärstreifen jeweils orange eingefärbt ist.

Für jeden Teilblock gilt: Im Gebiet in dem sich Primärstreifen und Sekundärstreifen überlappen, können Verknüpfungspunkte mit bis zu zehn Bildstrahlen gefunden werden; im übrigen Gebiet des Primärstreifens fünf. Außerdem gilt: Jeder der Streifen, der sich mit mehr als einem anderen Streifen überlappt, wird, wie in Abbildung 3.13 zu sehen, mehrmals als Primärstreifen verwendet und definiert damit mehrfach identische Punkte als Kandidaten für die Bestimmung der Verknüpfungspunkte (siehe Abschnitt 3.2.2). Zusammen ergibt sich daraus ein konzeptioneller Nachteil: Es wird nicht ausgenutzt, dass in Gebieten, in denen sich mehr als zwei Streifen überlappen, die Geländepunkte in mehr als zehn Bildern beobachtet werden können. Für die Bündelausgleichung des Blocks würde sich durch solche Mehr-Streifen-Punkte eine stabilere Geometrie ergeben. Außerdem würde sich die Anzahl der Unbekannten stärker reduzieren, als die der Beobachtungen. So würde sich ein kleineres Gleichungssystem

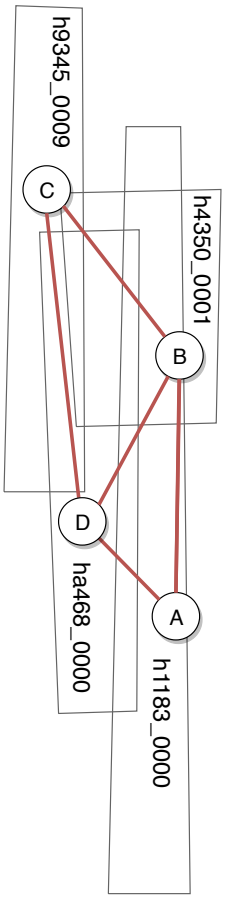


Abbildung 3.12. Überlappungsgraph und Footprints eines kleinen photogrammetrischen Blocks aus vier HRSC-Streifen: A: `h1183_0000`, B: `h4350_0001`, C: `h9435_0009`, D: `ha469_0000`

mit höherer Redundanz ergeben. Um diese geometrisch stabilere Situation zu erreichen, wurde das Konzept der M-Teilblöcke eingeführt, bei denen homologe Punkte in allen verfügbaren Bildstreifen zugeordnet werden. Der gesamte Block wird dazu in ebenso viele Teilblöcke aufgeteilt, wie er Streifen enthält; für das hier gezeigte Beispiel also in vier. Jeder Streifen ist dann genau einmal Primärstreifen. Die Anzahl der Sekundärstreifen variiert jeweils und entspricht der Anzahl der Kanten am jeweiligen Knoten im Überlappungsgraph. In Abbildung 3.14 ist diese Einteilung in M-Teilblöcke dargestellt.
Für größere Blöcke ergeben sich deutlich komplexere Überlappungsgraphen und selbstverständlich ist auch die Anzahl der Teilblöcke größer. Sie entspricht bei M-Teilblöcken stets der Anzahl der Streifen, wohingegen sie bei P-Teilblöcken deutlich höher ist (siehe Tabelle 3.3) und wie folgt begrenzt ist:

$$(n_S - 1) \cdot 2 <= n_T <= \binom{n_S}{2} \cdot 2$$

Dabei ist n_S die Anzahl der Streifen. Die tatsächliche Anzahl der P-Teilblöcke n_T hängt von der Topologie des Blocks ab. Aus praktischer Sicht sind die P-Teilblöcke zu bevorzugen, da sie einige Vorteile gegenüber den M-Teilblöcken haben:

- P-Teilblöcke können grundsätzlich auch für andere Blöcke verwendet werden, solange dieselben zwei Streifen enthalten sind. Dadurch reduziert sich z.B. der Aufwand bei der systematischen Ausgleichung der MC-30-Halbkacheln. Bei M-Teilblöcken ist die Wiederverwendbarkeit von Teilblöcken für andere Blöcke nur möglich wenn diese komplett im ursprünglichen Block enthalten

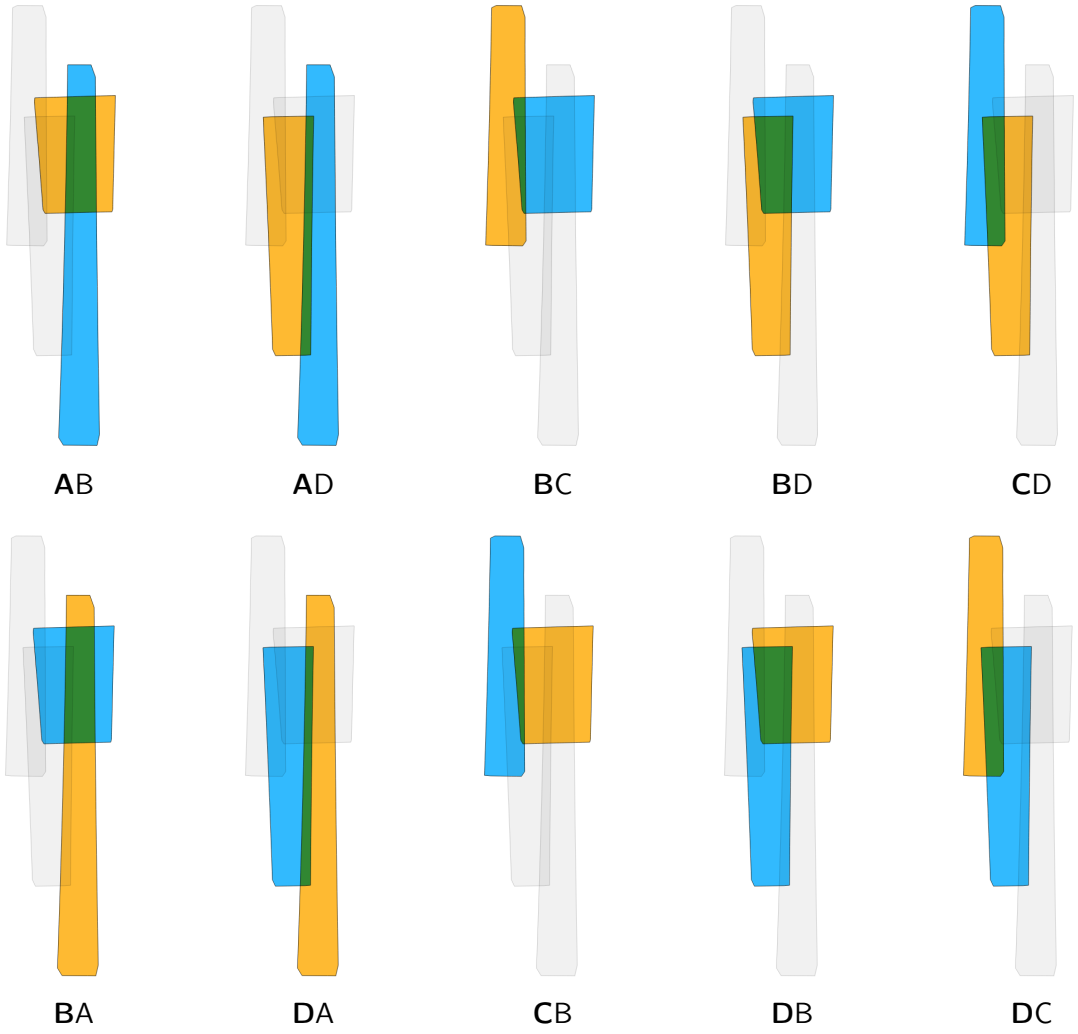


Abbildung 3.13. P-Teilblöcke: Jeweils 2 Streifen; blau: Primärstreifen, orange: Sekundärstreifen

sind.

- Da im Gegensatz zu den M-Teilblöcken jeder P-Teilblock jeweils aus genau zwei Streifen besteht, variieren die zur Verarbeitung benötigten Rechnerressourcen und Laufzeiten pro Teilblock erheblich weniger als bei M-Teilblöcken. Dieses ist besonders relevant, wenn eine effiziente Verarbeitung der Teilblöcke parallel erfolgen soll.
- Einige Streifen des globalen HRSC-Datensatzes lassen sich, oftmals aufgrund minderer Bildqualität, nur schlecht mit anderen Streifen über Verknüpfungspunkte verbinden und führen bereits bei der Verarbeitung der Teilblöcke zu Problemen in der Prozesskette. Werden P-Teilblöcke verwendet, können diese Streifen aus den Blöcken automatisch entfernt werden, indem die entsprechenden P-Teilblöcke nicht verwendet werden. Bei den M-Teilblöcken muss der problematische Streifen aus jedem M-Teilblock entfernt werden, in dem er enthalten ist. Sowohl automatisch, als auch manuell ist dieses sehr aufwendig.

Da nun die oben angeführten theoretischen Überlegungen die M-Teilblöcke favorisieren, während die praktischen Aspekte für die Variante der P-Teilblöcke sprechen, werden in Abschnitt 4.3.2 beide Varianten empirisch verglichen. Der im folgenden Abschnitt beschriebene Verknüpfungspunktfilter wird später auf beide Varianten angewendet.

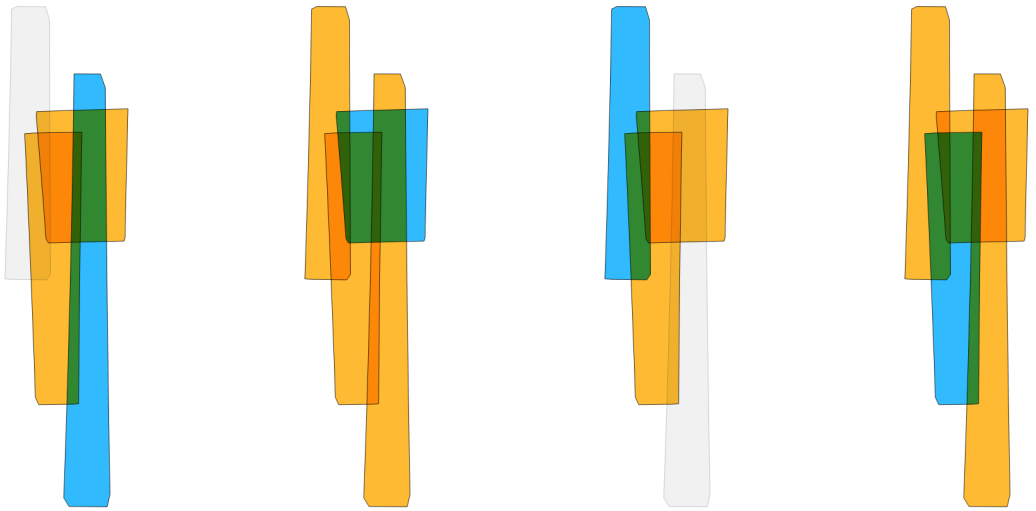


Abbildung 3.14. M-Teilblöcke: In diesem Beispiel jeweils 3 bzw. 4 Streifen; blau: Primärstreifen, orange: Sekundärstreifen

3.3.4. Verknüpfungspunktfilter

Ziel des hier vorgestellten, objektraumbasierten Verknüpfungspunktfilters ist, eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte über die vom Block abgedeckte Fläche herzustellen. Diese Homogenisierung der Verknüpfungspunkte, bezogen auf ihre Lage, ist für die Anpassung an das MOLA-DGM im Rahmen der Bündelausgleichung von Vorteil und erfolgt über eine Reduktion der Punktanzahl.

Da für die systematische Verarbeitung großer Blöcke auch rechentechnische Aspekte wie Laufzeit und Arbeitsspeicherbedarf berücksichtigt werden müssen, ist eine geringere Anzahl an Verknüpfungspunkten grundsätzlich zu bevorzugen. Für die Bündelausgleichung reduziert sich dadurch die Anzahl der Beobachtungen und Unbekannten. Bei der Reduktion der Verknüpfungspunkte muss der Filter dabei aber die Anforderung erfüllen, dass für die Bündelausgleichung wichtige Verknüpfungen zwischen den Streifen erhalten bleiben und sich dadurch die Ergebnisse der Blockausgleichung nicht verschlechtern. Es wird dabei die Annahme getroffen, dass Streifen miteinander verknüpft sind, wenn es mindestens einen gemeinsamen Punkt gibt, welcher in einem oder mehreren Bildern der jeweiligen Streifen beobachtet wurde.

Als Eingangsdaten für die Filterung werden die Verknüpfungspunkte aus allen Teilblöcken verwendet (siehe Abbildung 3.8). Für jeden Verknüpfungspunkt werden die 3D-Koordinaten in einem gemeinsamen kartesischen Objektkoordinatensystem berechnet. Außerdem wird jeweils der Vorwärtsschnittfehler (VSF) ermittelt (siehe Abschnitt 3.2.4). Ein in der XY-Ebene definiertes, zweidimensionales Raster wird nun genutzt, um die 3D-Punkte, reduziert auf ihre Lage in der XY-Ebene, in Gruppen einzuteilen. Die Z-Koordinate der Punkte spielt dabei keine Rolle. Die Verwendung des Rasters sorgt bei der Filterung für die gleichmäßige Verteilung der Punkte. Durch Anpassung der Rasterzellengröße kann die Anzahl an Gruppen und damit die aus der Filterung resultierende Anzahl an Verknüpfungspunkten gesteuert werden. Der Einfluss der Rasterzellengröße auf die Ergebnisse der Bündelausgleichung wird in Abschnitt 4.3.2 empirisch untersucht. In Abbildung 3.15 sind einige Verknüpfungspunkte des oben bereits gezeigten 4-Streifen-Blocks dargestellt. Die Punkte sind anhand der Anzahl der Streifen, in denen jeweils Bildpunkte zugeordnet werden konnten, eingefärbt: Die gelben Punkte konnten in drei Streifen, die grünen in zwei und die türkisfarbenen nur in den Bildern eines Streifens zugeordnet werden.

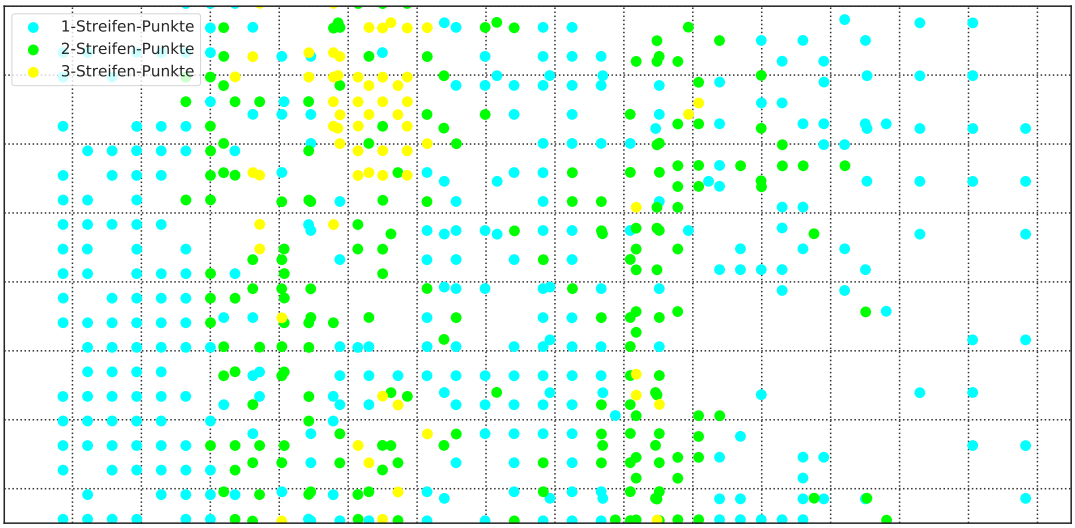


Abbildung 3.15. Verknüpfungspunkte mehrerer M-Teilblöcke; Beispiel für Einteilung in Gruppen anhand eines Rasters; Einfärbung der Punkte abhängig von der Anzahl der jeweils verknüpften Streifen

Das in der Abbildung 3.15 eingezeichnete Raster teilt die Punkte in Gruppen ein. Jede dieser Punktgruppen wird nun im Filter einzeln und unabhängig von den anderen Gruppen ausgedünnt. Rechentechnisch ist also eine parallelisierte Umsetzung des Filters möglich.

Jede Gruppe kann als Menge von Punkten $\mathbf{G}_j = \{P_1, P_2, ..., P_n\}$ betrachtet werden, in der jeder Punkt P_i mit den drei Eigenschaften $\mathbf{S}_{P_i}$, $n\mathbf{B}_{P_i}$ und VSF_{P_i} beschrieben wird:

- $\mathbf{S}_{P_i}$

  Die Menge der Streifen, in denen dieser Punkt Bildbeobachtungen aufweist.
  Beispiel: $\mathbf{S}_{P_3} = \{A, B, D\}$, wenn Punkt 3 in den Streifen A, B, und D beobachtet wurde.

- $n\mathbf{B}_{P_i}$

  Die Anzahl der Elemente in der Menge der Bilder, zu welchen der Punkt Bildbeobachtungen aufweist.
  Beispiel: $n\mathbf{B}_{P_5} = 8$, wenn $\mathbf{B}_{P_5} = \{ND_A, S1_A, S2_A, ND_D, S1_D, S2_D, P1_D P2_D\}$ der Menge der Bilder entspricht, in denen der Punkt 5 beobachtet wurde.

- VSF_{P_i}

  Der Vorwärtsschnittfehler der sich bei der Bestimmung der Objektkoordinaten des Punktes ergibt (siehe Abschnitt 3.2.4).
  Beispiel: $\text{VSF}_{P_2} = 20{,}5\,\text{m}$, wenn Punkt 2 mit einen mittleren Punktfehler von 20,5 m bestimmt wurde.

Außerdem werden für jede Gruppe $\mathbf{G}_j$ folgende vier Eigenschaften als Variablen im Algorithmus benötigt:

- $\mathbf{S}_{\mathbf{G}_j}$

  Die Vereinigungsmenge aller $\mathbf{S}_{P_i}$. Diese umfasst alle Streifen zu denen es Verknüpfungspunkte in dieser Gruppe $\mathbf{G}_j$ gibt. In wie vielen und in welchen Bildern der Streifen es jeweils Bildbeobachtungen gibt, wird dabei nicht beachtet.

- $max(|\mathbf{S}_{P_i}|)_j$

  Die maximale Kardinalität gibt die maximale Größe der Menge an Streifen an, die ein einzelner Punkt P_i in seiner Gruppe $\mathbf{G}_j$ verknüpft.

- $max(n\mathbf{B}_{P_i})_j$

  Die maximale Anzahl an Bildern, in denen ein einzelner Punkt P_i in seiner Gruppe $\mathbf{G}_j$ beobachtet wurde.

- $min(\mathrm{VSF}_{P_i})_j$

  Der minimale Vorwärtsschnittfehler den ein Punkt P_i in seiner Gruppe $\mathbf{G}_j$ aufweist.

Ziel des im Folgenden beschriebenen Algorithmus ist es nun, für jede Gruppe $\mathbf{G}_j$ eine Untermenge von Punkten $\mathbf{F}_j$ zu bestimmen, die folgende drei Kriterien erfüllt:

1. Die resultierende Menge $\mathbf{S}_{\mathbf{F}_j}$ soll identisch mit der ursprünglichen Menge $\mathbf{S}_{\mathbf{G}_j}$ sein.
   Beispiel: $\mathbf{S}_{\mathbf{F}_1} = \mathbf{S}_{\mathbf{G}_1} = \{A, B, C\}$

2. Keine Verknüpfung die anfangs in $\mathbf{S}_{\mathbf{G}_j}$ existierte soll anschließend in $\mathbf{S}_{\mathbf{F}_j}$ fehlen.
   Beispiel: Existieren in $\mathbf{S}_{\mathbf{G}_j}$ drei Punkte mit $\mathbf{S}_{P_1} = \{A, B\}$, $\mathbf{S}_{P_2} = \{B, C\}$ und $\mathbf{S}_{P_3} = \{A, C\}$, so müssen diese auch in $\mathbf{S}_{\mathbf{F}_j}$ erhalten bleiben, da es sich um unterschiedliche Verknüpfungen handelt.

3. Die Anzahl der Punkte in der Menge $\mathbf{F}_j$ soll minimal sein.
   Beispiel: Ein Punkt mit $\mathbf{S}_{P_4} = \{A, B, C\}$ ist besser als zwei Punkte mit $\mathbf{S}_{P_1} = \{A, B\}$ und $\mathbf{S}_{P_2} = \{B, C\}$

Durch die ersten beiden Forderungen bleibt die Stabilität des Blocks grundsätzlich erhalten. Durch die dritte Forderung erfolgt pro Gruppe die Minimierung der gesamten Punktanzahl im Block.

Um für jede Gruppe $\mathbf{G}_j$ diese optimale Untermenge $\mathbf{F}_j$ zu bestimmen, wurde der folgende iterative Algorithmus im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und für die späteren Experimente verwendet. Dieser enthält drei Schritte:

1. **AUSWAHL**

   Aus $\mathbf{G}_j$ werden alle Punkte ausgewählt, für die $|\mathbf{S}_{P_i}| = max(|\mathbf{S}_{P_i}|)_j$ gilt. Aus diesen werden wiederum alle Punkte ausgewählt für die $n\mathbf{B}_{P_i} = max(|n\mathbf{B}_{P_i}|)_j$ gilt und schließlich aus diesen der Punkt P_i mit $\mathrm{VSF}_{P_i} = min(\mathrm{VSF}_{P_i})_j$. Dieser Punkt wird nun aus $\mathbf{G}_j$ entfernt und zu $\mathbf{F}_j$ hinzugefügt.

2. **REDUKTION**

   Alle Punkte, bei denen $\mathbf{S}_{P_i}$ eine Kombination der Menge $\mathbf{S}_{P_i}$ des ausgewählten Punktes ist, werden aus $\mathbf{G}_j$ entfernt.

3. **ENDE**

   Wenn nach der Reduktion noch Punkte in $\mathbf{G}_j$ vorhanden sind, wird mit diesen Punkten erneut mit der AUSWAHL begonnen und so die nächste Iteration durchgeführt. Wenn $\mathbf{G}_j$ nach der Reduktion leer ist, wird der Algorithmus abgebrochen und die in der Gruppe $\mathbf{F}_j$ enthaltenen Punkte für diese Rasterzelle als Ergebnis verwendet.

In Abbildung 3.16 ist der Ablauf grafisch dargestellt. Das Beispiel zeigt die Filterung für eine einzelne Gruppe von neun Punkten, deren Rasterzelle sich in einem Bereich eines Blocks befindet, in dem sich die Streifen A, B, C und D überlappen:

$$\mathbf{S}_{\mathbf{G}_j} = \{A, B, C, D\}$$

Die Aufteilung des Blocks erfolgte in diesem Beispiel in M-Teilblöcke. Aus diesem Grund sind auch Punkte vorhanden, welche mehr als zwei, hier maximal drei Streifen miteinander verbinden:

$$max(|\mathbf{S}_{P_i}|) = 3$$

In der AUSWAHL der ersten Iteration werden nun die drei Punkte mit $|\mathbf{S}_{P_i}| = 3$ ausgewählt. Von diesen werden anschließend zwei Punkte anhand der Anzahl der Bilder ausgewählt:

$$max(|n\mathbf{B}_{P_i}|) = 15$$

Zuletzt wird von den zwei verbleibenden Punkten der Punkt mit dem niedrigsten VSF ausgewählt:

$$min(\mathrm{VSF}_{P_i}) = 7{,}5\,\mathrm{m}$$

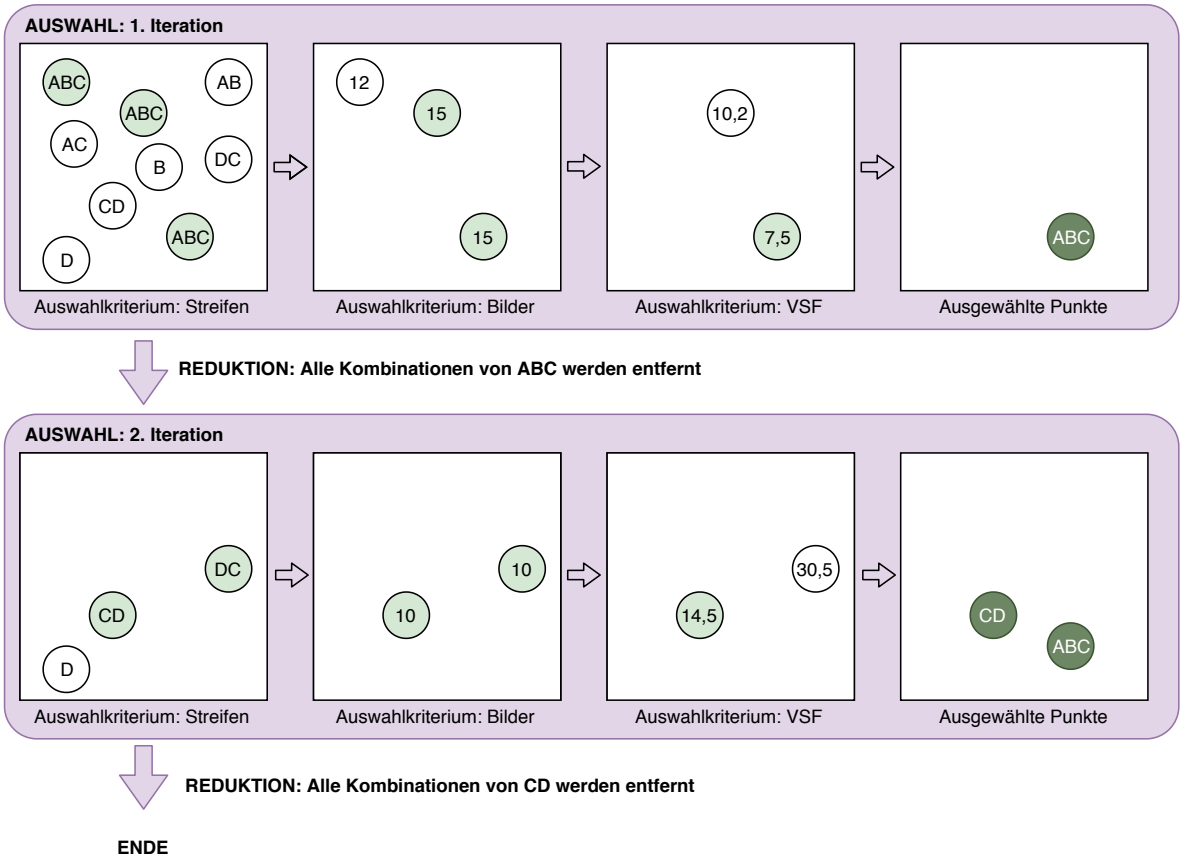


Abbildung 3.16. Algorithmus zur Filterung der Verknüpfungspunkte: Aus einer Gruppe von ursprünglich neun Punkten werden im skizzierten Beispiel zwei Punkte ausgewählt.

Welche Punkte nun aus der Gruppe durch die REDUKTION entfernt werden, wird anhand der Menge der Streifen, die der ausgewählte Punkt verbindet, entschieden:

$$\mathbf{S}_{P_i} = \{A, B, C\}$$

Es verbleiben also nur die Punkte, welche in Streifen D beobachtet wurden (ihre Menge $\mathbf{S}_{P_i}$ ist keine Kombination von $\{A, B, C\}$). Mit diesen wird nun die zweite Iteration ausgeführt und ein zweiter Punkt ausgewählt. Da durch die anschließende REDUKTION keine weiteren Punkte in $\mathbf{G}_j$ verbleiben, ist das Abbruchkriterium erfüllt. Als Ergebnis enthält $\mathbf{F}_j$ die zwei ausgewählten Punkte. In Abbildung 3.17 sind dieselben Punkte wie in Abbildung 3.15 dargestellt. Diesmal sind die vom Filter ausgewählten Punkte hervorgehoben. In vielen Zellen ist genau ein gelber 3-Streifen-Punkt ausgewählt worden, welcher jeweils die drei möglichen Streifen verbindet. In anderen Zellen sind zwei 2-Streifen-Punkte ausgewählt worden, um die maximale Anzahl an Verbindungen zu erhalten. In anderen Rasterzellen wurde ein 2-Streifen-Punkt mit einem 1-Streifen-Punkt kombiniert, wenn es nicht anders möglich war, zu verhindern, dass einer der Streifen alle Punktbeobachtungen verliert.

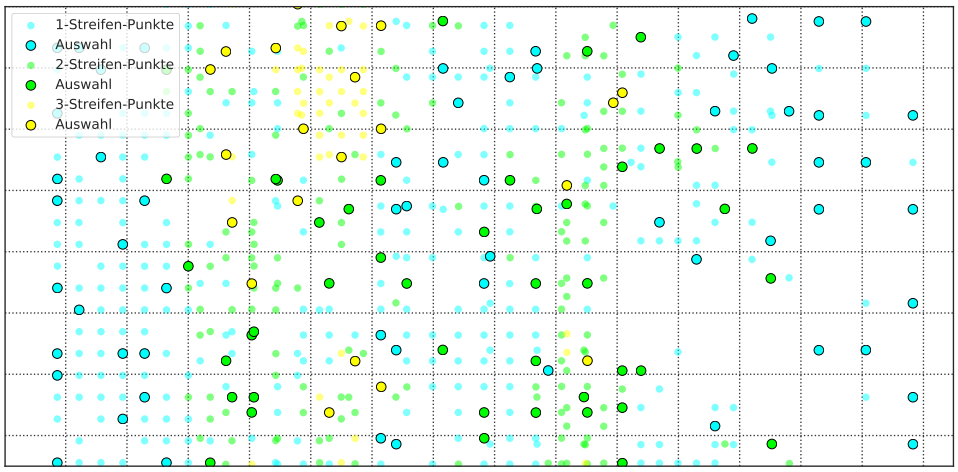


Abbildung 3.17. Ausgewählte Verknüpfungspunkte (schwarz umrandet) und vom Verknüpfungspunktfilter ausgefilterte Punkte; teilweise mehrere ausgewählte Punkte pro Rasterzelle; Einfärbung der Punkte abhängig von der Anzahl der jeweils verknüpften Streifen

Bei der Filterung der Punkte aus P-Teilblöcken werden in Gebieten, in denen sich mehr als zwei Streifen überlappen, in der Regel mehrere Punkte ausgewählt, da nur dadurch alle Verbindungen erhalten bleiben können. Ein entsprechendes Beispiel ist bei den Ergebnissen in Abbildung 4.24 dargestellt. Die vom Verknüpfungspunktfilter ausgewählten Verknüpfungspunkte aller Rasterzellen werden, wie in Abbildung 3.8 dargestellt, als Eingangsdaten für die im nächsten Abschnitt beschriebene Blockausgleichung verwendet.

3.3.5. Blockausgleichung

Für die gemeinsame Ausgleichung aller Streifen des Blocks werden, neben den vom Verknüpfungspunktfilter ausgewählten Verknüpfungspunkten, die aus der Einzelstreifenausgleichung hervorgegangenen Orientierungsdaten (aOD) aller Streifen, sowie das MOLA-DGM als Eingangsdaten verwendet (siehe Abbildung 3.8). Das Ziel der Blockausgleichung ist die relative Lage der Streifen zueinander zu optimieren, ohne dabei die absolute Position bezogen auf das MOLA-DGM oder die Qualität der Orientierungsdaten bezogen auf ihre Präzision bei der Objektpunktbestimmung signifikant zu verschlechtern. Die in der Einzelstreifenausgleichung bestimmten Winkel entlang des jeweiligen Orbit-Abschnitts sind der wesentliche Beitrag zu einer Verbesserung der Präzision bei der Objektpunktbestimmung und sollen beibehalten werden. Dazu werden in der Blockausgleichung nur am Anfang und am Ende eines jeden Streifens Orientierungspunkte definiert und ohne die Verwendung

weiterer Orientierungspunkte innerhalb der Streifen linear interpoliert (siehe Abschnitt 3.1.2). Auftretende Interpolationsfehler werden vor der Ausgleichung bestimmt und als konstante Werte über alle Iterationsschritte der Ausgleichung beibehalten. Außerdem werden die Standardabweichungen der beobachteten äußeren Orientierung an den Anfangs- und Endpunkten, sowohl für Winkel als auch für die Position, zu Null gesetzt. Eine gemeinsame Translation der beiden Orientierungspunkte wird, wie auch in der Einzelstreifenausgleichung, über einen Bias realisiert. Driften werden in der Blockausgleichung nicht angesetzt. Das MOLA-DGM wird erneut als Referenzfläche verwendet. Die iterative Ausgleichung des Blocks erfolgt, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, in vier Schritten, um mögliche grobe Fehler in den Beobachtungen zu eliminieren.

Ebenso wie in der Einzelstreifenausgleichung, werden innerhalb des Bündelausgleichungsmoduls die blockausgeglichenen Orientierungsdaten (bOD) durch Interpolation für alle Bilder im Block berechnet. Dazu werden die in der Blockausgleichung geschätzten Parameter der äußeren Orientierung an den Orientierungspunkten, sowie die geschätzten Biasparameter verwendet. In der Evaluierung werden die bOD mit den nominellen Orientierungsdaten (nOD) und den aus der Einzelstreifenausgleichung hervorgegangenen Orientierungsdaten (aOD) verglichen. Dabei werden die Vorwärtsschnittfehler (VSF) ausgewertet, um eine mögliche Veränderung der Präzision der Objektpunktbestimmung aufzudecken. Die Analyse der MOLA-Differenzen (MDiff) dient der Sicherstellung, dass sich die Anpassung der HRSC-Streifen an das MOLA-DGM nicht verschlechtert hat. Zusätzlich werden, wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, Punkt-zu-Punkt-Differenzen (PDiff) benachbarter Streifen analysiert, um eine mögliche Verbesserung der Passgenauigkeit der Streifen zueinander zu evaluieren. Liefert die Evaluierung zufriedenstellende Ergebnisse, können die Orientierungsdaten dieses Blocks zur Erstellung von Level-5-Daten verwendet werden (siehe Abschnitt 2.2.4).

3.3.6. Stellgrößen des Verfahrens

Mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren soll es möglich sein, große HRSC-Blöcke automatisch und systematisch zu verarbeiten. „Automatisch“ bedeutet, dass bei der Verarbeitung der Streifen und Blöcke kein manuelles Auswählen von Daten und kein individuelles Einstellen von Stellgrößen erfolgt. „Systematisch“ bedeutet, dass alle verfügbaren HRSC-Daten mit der verfügbaren Rechenleistung in vertretbarer Zeit verarbeitet werden.

In allen Modulen des zweistufigen Ablaufs müssen die Stellgrößen daher so gewählt werden, dass sich damit alle Daten verarbeiten lassen. Den Arbeiten zur Verknüpfungspunktbestimmung (Schmidt, 2008) und zur Bündelausgleichung (Spiegel, 2007), auf denen diese Arbeit direkt aufbaut, lag dieser Gedanke ebenfalls zu Grunde, so dass einige der gewählten Abläufe und Stellgrößen übernommen werden konnten. In beiden Arbeiten stand aber - auch wenn bereits erste Blöcke behandelt wurden - die Einzelstreifenausgleichung im Vordergrund. Für die systematische Verarbeitung der hier behandelten großen Halbkachel-Blöcke existierten bislang keine Ansätze. Erst im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu ein Verfahren entwickelt, welches im folgenden Kapitel 4 experimentell validiert wird. Dabei soll die Wahl einiger Stellgrößen empirisch unterstützt werden. Für die Einzelstreifenausgleichung muss bei der Verknüpfungspunktbestimmung die **Anzahl der Gitterpunkte** so gewählt sein, dass für die Ausgleichung ausreichend Orientierungspunkte verfügbar bleiben. Dabei muss berücksichtigt werden, nach welchem Ansatz (kOPD, vOPD) die **Anordnung der Orientierungspunkte** erfolgt (siehe Abschnitt 3.1.2). Für die Blockausgleichung ist ebenfalls eine sinnvolle Anzahl an Verknüpfungspunkten festzulegen. Dazu wird zunächst die geeignete **Teilblockvariante** gewählt. Bei der Filterung der Verknüpfungspunkte muss eine **Rasterzellengröße** gewählt werden, welche die Anzahl genutzter Verknüpfungspunkte ausreichend reduziert, ohne dabei die Ergebnisse der Blockausgleichung zu beeinträchtigen.

4. Experimente und Ergebnisse

Nachdem im vorigen Kapitel 3 die Beschreibung des Verfahrens erfolgte, soll nun auf die Anwendung anhand der HRSC-Daten eingegangen und durchgeführte Experimente und deren Ergebnisse betrachtet werden. Das Kapitel ist dazu in vier Abschnitte unterteilt. Zuerst wird auf die Ziele der durchgeführten Experimente eingegangen und anschließend der HRSC-Datensatz beschrieben, welcher in den Experimenten Verwendung findet (siehe Abschnitt 4.1). Dabei wird vor allem auf die für die Bündelausgleichung relevanten Eigenschaften der Daten eingegangen. Entsprechend der in Abschnitt 3.3 beschriebenen zweistufigen Bündelausgleichung, ist die Darstellung der Experimente und Ergebnisse ebenfalls in zwei Teile aufgeteilt. In Abschnitt 4.2 werden die HRSC-Streifen einzeln und in Abschnitt 4.3 als Blöcke verarbeitet. In Abschnitt 4.4 erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse.

4.1. Ziele und Daten

4.1.1. Zielsetzung der Experimente

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens, das es erlaubt, die Aufnahmen der HRSC in photogrammetrischen Blöcken zu verbinden und durch eine gemeinsame Blockausgleichung die Orientierungsdaten der Bildstreifen zu optimieren. Das Verfahren soll sich auf den globalen HRSC-Datensatz anwenden lassen und möglichst überall eine Verbesserung gegenüber den nominellen Orientierungsdaten erzielen (siehe Abschnitt 1.2). Daher lassen sich die Ziele der hier durchgeführten Experimente wie folgt zusammenfassen:

1. Überprüfung der Anwendbarkeit des vorgestellten Verfahrens,
2. Empirische Bestimmung allgemeingültiger Stellgrößen (siehe Abschnitt 3.3.6),
3. Quailitätsbeurteilung der resultierenden Orientierungsdaten.

Die Aufnahmen der HRSC spielen für die systematische Kartierung der Marsoberfläche eine wichtige Rolle. Der Datensatz bildet mit seiner globalen Abdeckung und gleichzeitig hohen Auflösung eine einzigartige Grundlage für die Erstellung regionaler kartographischer Daten. Er ist ideal um höher aufgelöste Bilddaten mit dem globalen, als Referenzsystem genutzten, MOLA-DGM zu verbinden. Da die HRSC-Daten bezüglich ihrer Abdeckung wenig Redundanz aufweisen, ist es besonders wichtig, dass jeder einzelne Streifen mit dem Verfahren aufbereitet werden kann. Zusätzlich kommt es bei der Erstellung von Blöcken darauf an, dass möglichst alle Streifen miteinander verbunden werden können, damit große, lückenlose Mosaike entstehen. Somit lassen sich die genannten Ziele wie folgt detaillieren:

1. Es soll sichergestellt werden, dass das entwickelte Verfahren für alle zur Kartierung der Marsoberfläche geeigneten HRSC-Daten anwendbar ist. Um dies festzustellen, werden alle am 30. Oktober 2018 verfügbaren HRSC-Datensätze als Einzelstreifen (siehe Abschnitt 4.2) und der Bereich zwischen 30° nördlicher und 30° südlicher Breite entlang des gesamten Äquators als Blöcke ausgewertet (siehe Abschnitt 4.3).

2. Einige der gewählten Stellgrößen (siehe Abschnitt 3.3.6) sollen empirisch bestimmt und überprüft werden, um sicherzustellen, dass für alle Daten gute Ergebnisse zu erzielen sind, wobei ein sinnvoller Kompromiss zwischen möglichst hoher Qualität der Ergebnisse und operationeller Machbarkeit angestrebt wird. Dazu werden mehrere Testreihen ausgewertet und der Einfluss der Verknüpfungspunktdichte (siehe Abschnitt 4.2.2) sowie die Rasterzellengröße des Verknüpfungspunktfilters untersucht (siehe Abschnitt 4.3.2).

3. Da die Bilddaten der HRSC zum Teil sehr unterschiedlich sind (siehe Abschnitt 4.1.2) und die Topographie der Marsoberfläche äußerst abwechslungsreich ist, sollen die Ergebnisse jeder Einzelstreifenausgleichung und jeder Blockausgleichung systematisch evaluiert werden. Die Ergebnisse der Evaluierung können genutzt werden, um für die Erstellung von DGM und Orthofotos geeignete Daten auszuwählen und deren Genauigkeit zu beurteilen.

4.1.2. Verwendete HRSC-Daten

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit (Dezember 2019) befindet sich *Mars Express* in Orbit Nr. 20 224. Die in diesem Kapitel beschriebenen Experimente verwenden die Daten bis einschließlich Orbit Nr. 18 762, welcher am 30. Oktober 2018 aufgenommen wurde. Die HRSC hatte zu diesem Zeitpunkt seit der ersten Aufnahme am 9. Januar 2004 in Orbit Nr. 8 insgesamt 5 327 Aufnahmen gemacht.

Nicht alle dieser Aufnahmen sind für die durchgeführten Untersuchungen relevant: Bereits vorab können Aufnahmen der Marsmonde Phobos und Deimos ausgeschlossen werden. Auch Aufnahmen der Kategorie *AURORA*, *LIMB*, *TERMINAL* und *SPOT* sind für für Kartierung der Marsoberfläche nicht geeignet und wurden somit aussortiert. Ebenso werden 20 Aufnahmen, bei denen mit weniger als drei der panchromatischen Kanäle aufgezeichnet wurde, nicht verwendet. Grundsätzlich wäre es zwar denkbar, dass die Verwendung dieser Streifen, bei denen in 19 Fällen ausschließlich das Nadirbild existiert, auch Vorteile bringen kann, hierzu müsste das Verfahren jedoch umfangreich angepasst werden, weshalb darauf verzichtet wurde. Für die in den folgenden Abschnitten 4.2 und 4.3 beschriebenen Experimente stehen somit insgesamt 4 418 Aufnahmen zur Verfügung, welche grundsätzlich zur Kartierung der Planetenoberfläche geeignet sind. Es ist dabei zu beachten, dass in diesem Datensatz noch Streifen enthalten sind, die bei genauerer Betrachtung ebenfalls bereits vorher ausgeschlossen werden könnten, da sie z.B. ungeeignete Bildqualität oder Datenfehler enthalten. Da ein manuelles Auswählen zeitaufwendig ist, wird das Verfahren zur systematischen Blockausgleichung auf alle 4 418 Streifen angewendet und anhand der Ergebnisse festgestellt, welche der Streifen geeignet sind. Im Folgenden wird der verwendete HRSC-Datensatz zunächst anhand einiger Statistiken beschrieben: In 93,6 % der Streifen wurde mit allen fünf panchromatischen Kanälen der HRSC aufgezeichnet; In 5,8 % der Aufnahmen fehlen je zwei Kanäle; in 18 Aufnahmen jeweils ein Kanal (siehe Tabelle 4.1).

Kombination der Kanäle	**Anz. Streifen**	**Anteil**
ND, P1, P2, S1, S2	4 134	93,6 %
ND, S1, S2	255	5,8 %
ND, P2, S2	11	0,25 %
ND, P1, P2, S2	8	0,18 %
ND, P1, S1,	6	0,14 %
ND, P1, P2, S1	4	0,09 %

Tabelle 4.1. Auftretende Kanalkombinationen im globalen HRSC-Datensatz

Auf die Verwendung der Farbkanalbilder wird hier gänzlich verzichtet, da diese fast ausschließlich im MPF4 oder MPF8 vorliegen und ihre Verwendung keinen positiven Einfluss auf die Ergebnisse der Verknüpfungspunktbestimmung gezeigt hat (Schmidt, 2008). In welchen Makropixelformaten die Bilder der panchromatischen Kanäle jeweils vorliegen, ist in Tabelle 4.2 jeweils als Anzahl dargestellt.

Kanal	MPF1	MPF2	MPF4	MPF8
ND	4 377	29	12	0
P1	0	2 679	1 463	10
P2	0	2 678	1 469	10
S1	529	3 825	45	0
S2	529	3 833	46	0

Tabelle 4.2. Anzahl Bilder je *Makropixelformat* (MPF) und Kanal im globalen HRSC-Datensatz

Zur Beurteilung der geometrischen Auflösung der HRSC-Daten wird neben dem MPF vor allem die *Best Ground Sampling Distance* des Nadirbildes genutzt. In Abbildung 4.1 ist das Histogramm über alle Streifen dargestellt.

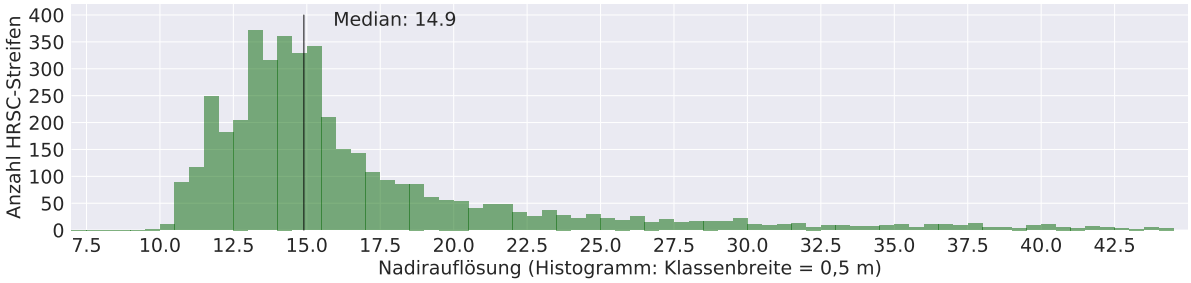


Abbildung 4.1. Nadirauflösung: Histogramm über alle HRSC-Streifen

Es zeigt sich, dass die nominelle Auflösung, häufig mit 10 m oder 12,5 m angegeben, nur für einen Teil der Streifen erreicht wird. Für die Hälfte der Streifen beträgt die Objektpixelgröße mehr als 14,9 m.

Ebenso wie die Auflösung, variiert die Streifenlänge, also die Anzahl der aufgezeichneten Bildzeilen, von Streifen zu Streifen. Ein Überblick darüber, wie viele jeweils im Nadirbild aufgezeichnet wurden, ist in Abbildung 4.2 gegeben; Die Anzahl der Bildzeilen für die anderen Kanäle weicht jeweils nur minimal ab.

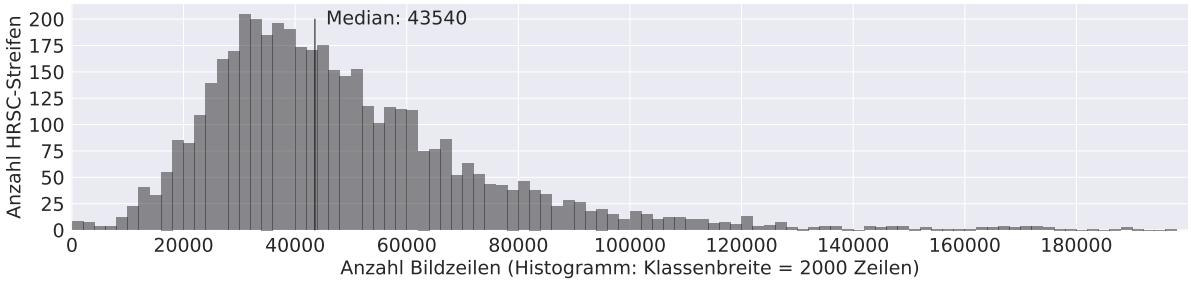


Abbildung 4.2. Anzahl der Bildzeilen im Nadirbild: Histogramm über alle HRSC-Streifen

Das Histogramm weist ein Maximum bei etwa 30 000 Bildzeilen auf. Der Median liegt bei rund 43 000 Bildzeilen. Auch Streifen mit mehr als 100 000 Bildzeilen sind, wie man an der rechten Flanke des Histogramms ablesen kann, nicht selten. Aus praktischer Sicht bedeutet die variierende Anzahl der Bildzeilen, dass bei der systematischen Verarbeitung der HRSC-Daten die benötigten Rechnerressourcen ebenfalls stark variieren. Dass nicht nur die Länge der Streifen variiert, sondern sich die Streifen teils auch stark in Form und Bildqualität unterscheiden und sich Letzteres auf die Ergebnisse der Verknüpfungspunktbestimmung auswirkt, ist später beispielhaft in Abbildung 4.16 zu erkennen. Wie unterschiedlich Helligkeit und Kontrast der HRSC-Streifen sein können, ist in Abbildung 4.3 anhand eines Ausschnitts der Halbkachel MC-11-E zu sehen.

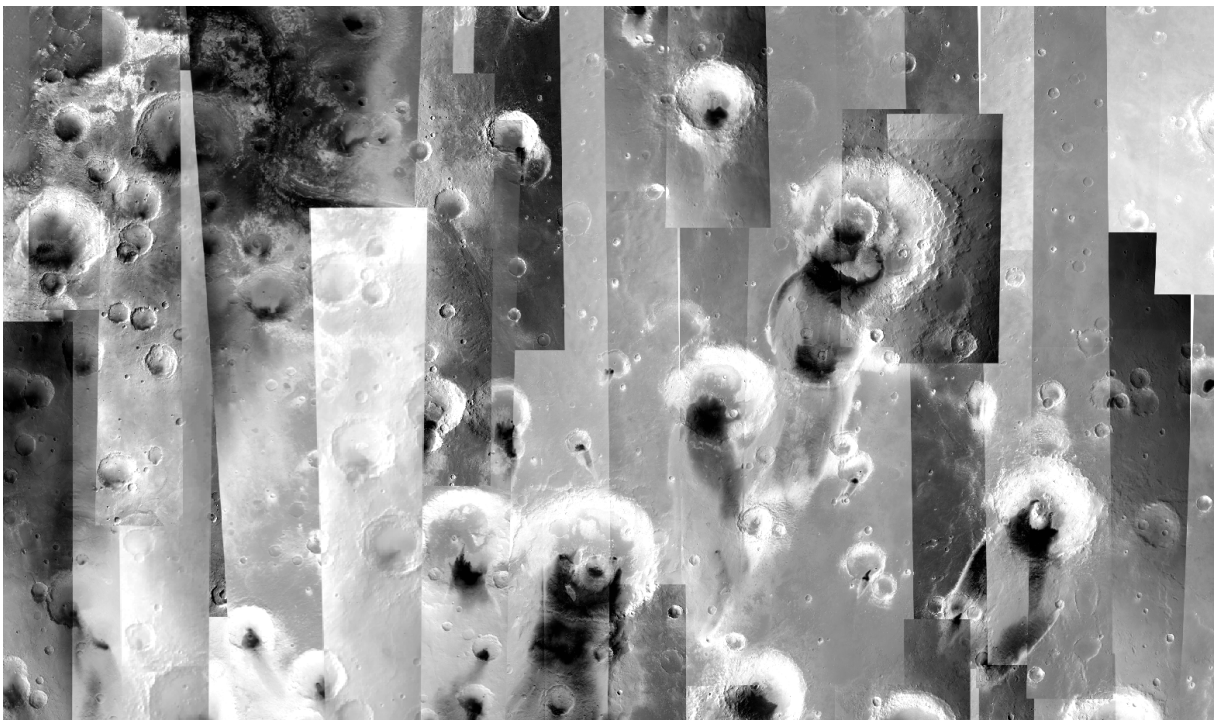


Abbildung 4.3. Heterogenität der Bildqualität; Ausschnitt der Halbkachel MC-11-E

Vor der Durchführung der Experimente erfolgt keine detaillierte Analyse, weder anhand der Beleuchtungssituationen oder allgemeiner Bildqualität, noch anhand anderer Charakteristika der Bilddaten. Stattdessen kann nachträglich, z.B. anhand der Ergebnisse der Verknüpfungspunktbestimmung, sehr zuverlässig die Bildqualität gemessen werden.

4.2. Einzelstreifenauswertung

Zunächst werden exemplarisch die Ergebnisse der Bündelausgleichung eines einzelnen HRSC-Streifens detailliert dargestellt. Die dabei gewählten Einstellungen und Parameter für die Vorverarbeitung, Verknüpfungspunktbestimmung, Bündelausgleichung und Evaluierung werden ebenso in den darauf folgenden Abschnitten verwendet.

4.2.1. Beispiel

Die HRSC-Aufnahme `hh864_0000` wurde am 11. Februar 2018 über der Thymiata Region (10°N, 350°E) aus Orbit Nr. 17 864 aufgenommen. Sie wird im Folgenden als Beispiel für die Auswertung eines einzelnen Streifens herangezogen.

In Abbildung 4.4 ist der Bildstreifen des Nadirkanals als Level-3-Bild dargestellt. Im Vergleich zu anderen HRSC-Aufnahmen ist dieser Streifen relativ kurz. Er zählt zu den kürzesten 5 % der Streifen. Das Nadirbild setzt sich aus nur 19 568 Bildzeilen zusammen. Es wurde, wie fast alle Streifen, in voller Auflösung (MPF1) abgespeichert. Die Breite des Bildes beträgt entsprechend der Anzahl aktiver Sensorelemente 5 176 Pixel. Auch die beiden Bilder der Stereokanäle S1 und S2 wurden bei dieser Aufnahme im MPF1 abgespeichert. Ihre Länge beträgt 19 424 (S1) und 19 984 (S2) Pixel. Die Bilder der Photometriekanäle wurden im MPF2 gespeichert. Entsprechend beträgt ihre Länge etwa die Hälfte (P1: 9 744 und P2: 9 864 Pixel). Zur Beschreibung der geometrischen Auflösung wird aus den Metadaten der Bilder die *Best Ground Sampling Distance* ausgelesen. Für das Nadirbild beträgt diese 20,5 m. Damit zählt diese Aufnahme zu den geringer aufgelösten Datensätzen (untere 20 %).

Ergebnisse der Verknüpfungspunktbestimmung

Entsprechend der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Prozesskette wird mit der Vorverarbeitung der Bilder begonnen. Als Objektpixelgröße für die Orthorektifzierung der Level-3-Bilder wird eine Auflösung von 41 m gewählt, was der doppelten Nadirauflösung entspricht. Für die Verknüpfungspunktbestimmung wird, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, so auch für diesen Streifen die Anzahl der Gitterpunkte abhängig von der Anzahl der Zeilen des Nadirbildes gewählt. Empirisch hat sich hier $1/4$ als sinnvoll erwiesen (Bostelmann und Heipke, 2016). In den meisten Fällen würde eine deutlich geringere Anzahl ausreichen. Dies gilt auch für diesen Streifen. Da aber eine individuelle Einstellung der Parameter vermieden werden soll, wird ein für alle Streifen geeigneter Wert gewählt. Das Gitter der Punkte hat dadurch stets eine ausreichende Dichte, sodass auch vereinzelt auftretende Schwingungen in den Orientierungsdaten durch die Bündelausgleichung beseitigt werden können. Eine genauere Untersuchung dazu folgt im nächsten Abschnitt (4.2.2).

Aus den 19 568 Bildzeilen ergibt sich eine angestrebte Anzahl von 4 892 Gitterpunkten. Für die Verknüpfungspunktbestimmung wird die im Rahmen voriger Arbeiten entwickelte Software *hrtp* verwendet (Schmidt, 2008). Aus den 4 892 angegebenen Punkten wird intern die Gitterweite für die Positionierung der Kandidatenpunkte berechnet. Abhängig von der Größe des Streifens kann sich dabei die Anzahl der Punkte etwas erhöhen. Das im Nadirbild angelegte Punktgitter umfasst dadurch für diesen Streifen 5 464 Punkte.

Die Einstellungen für die Punktzuordnung sind an die HRSC-Daten angepasst und werden aus den Arbeiten von Schmidt (2008) übernommen: Ein niedriger Schwellwert von 0,6 für die Kreuzkorrelation der Grauwertmatrizen lässt auch bei stark unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen Punktzuordnungen zu. Die Größe der Suchmatrix wird mit 5 x 5 Pixeln und die der Mustermatrix mit 35 x 35 Pixeln festgelegt. Die Fenstergröße für das Multi-Image Least Sqaures Matching (MI-LSM) wird ebenfalls auf 35 x 35 Pixel eingestellt und eine Änderung von 0,01 Pixeln zwischen den Iterationsschritten als Abbruchkriterium gewählt.

Aus der paarweisen Bildzuordnung mit den anderen vier panchromatischen Bildern dieses Streifens ergibt sich jeweils die in Tabelle 4.3 angegebene Anzahl an erfolgreich zugeordneten Bildpunktpaaren:

Master	Slave	Bildpunktpaare
ND	P1	4620
ND	P2	4636
ND	S1	4581
ND	S2	4792

Tabelle 4.3. Anzahl erfolgreich zugeordneter Bildpunktpaare bei der Verknüpfungspunktbestimmung

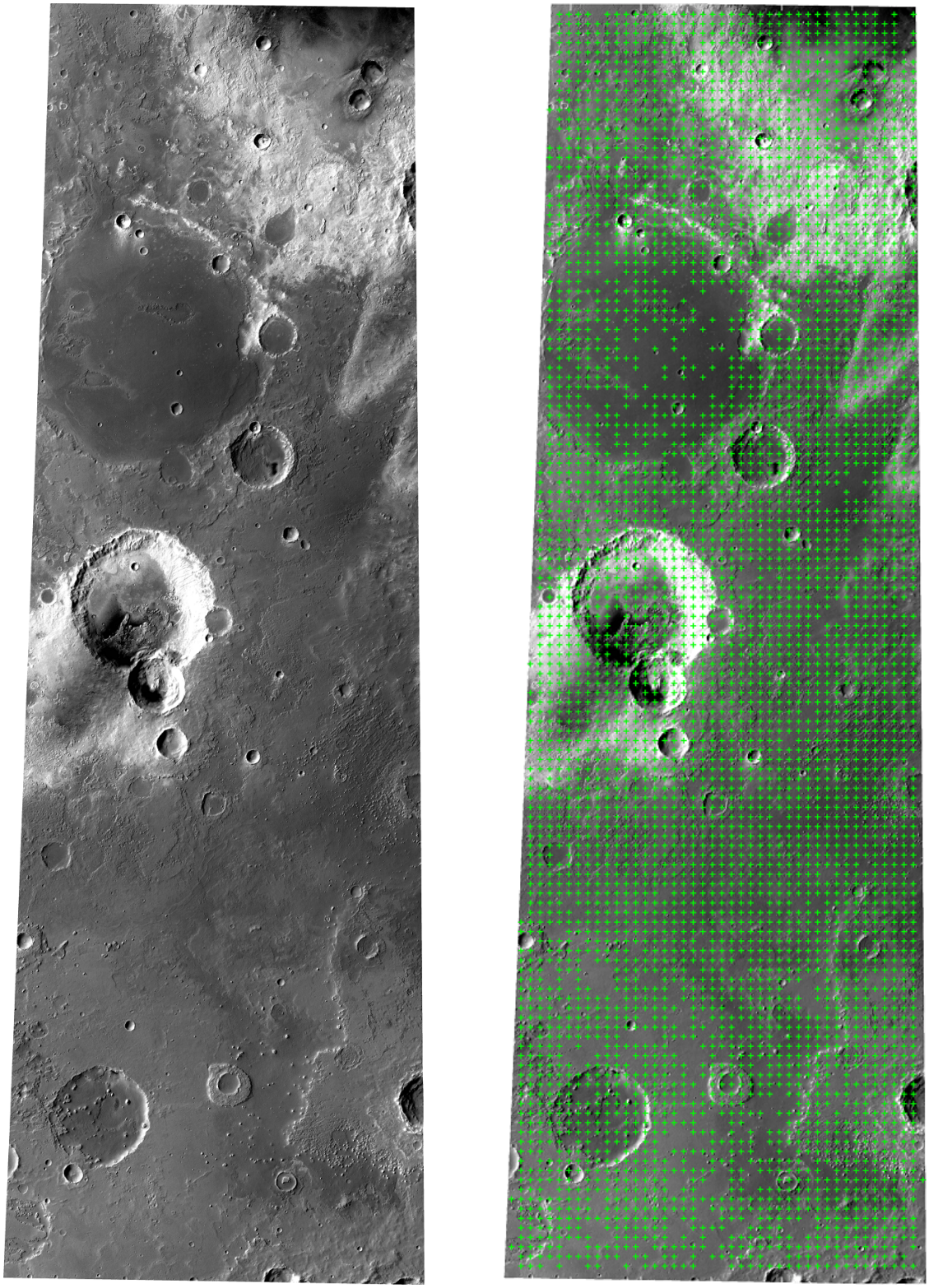


Abbildung 4.4. Nadirbild des HRSC-Streifens `hh864_0000` (Level-3); rechts überlagert mit 4 958 Verknüpfungspunkten, die in anderen Kanälen des Streifens zugeordnet werden konnten

Nicht jeder Punkt des Gitters wurde dabei in allen Bildern gefunden. Insgesamt ergeben sich über die Zuordnung der im Nadirbild vorgegebenen Kandidatenpunkte 4 958 Punkttupel. Im Mittel wurden die Punkte in 4,82 Bildern zugeordnet.

Die für jedes der Tupel durchgeführte Ausgleichung des MI-LSM konvergiert in 4 885 Fällen. Die Bildkoordinaten dieser Punkte werden als erfolgreich zugeordnete Punkte angesehen und für die Bündelausgleichung verwendet. Ihre Koordinaten sind rechts in Abbildung 4.4 markiert. Die Zuordnungsquote (4 885 Verknüpfungspunkte / 5 464 Kandidatenpunkte) liegt bei Streifen `hh864_0000` mit rund 89 % deutlich über dem Durchschnitt. Begründen lässt sich dies durch die in fast allen Bereichen des Bildes deutliche und kontrastreiche Geländestruktur. Nicht erfolgreich ist die Bildzuordnung nur in Bereichen mit sehr wenig Textur und geringem Kontrast, wie in dem vergrößerten Ausschnitt vom nördlichen Teil des Streifens in Abbildung 4.5 zu erkennen ist.

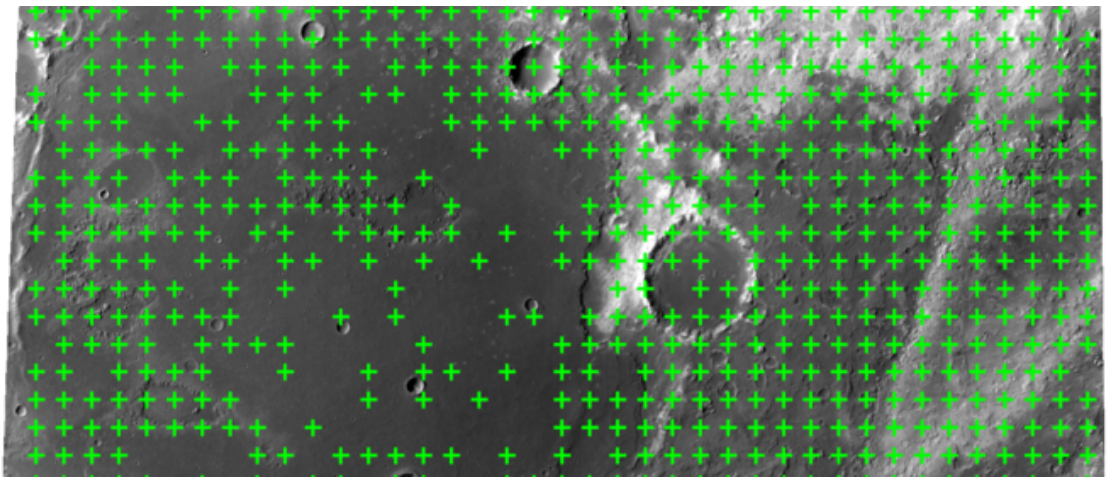


Abbildung 4.5. Als Gitter angeordnete Verknüpfungspunkte: erfolgreiche Bildzuordnung nur bei ausreichender Bildinformation; Ausschnitt des Nadirbildes vom HRSC-Streifens `hh864_0000`

Ergebnisse der Bündelausgleichung

Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, wird nun eine robuste Ausgleichung in zwei Schritten durchgeführt. Um grobe Fehler besser detektieren zu können, werden ausschließlich Verknüpfungspunkte verwendet, die in drei oder mehr Bildern beobachtet wurden. Von den 4 885 Verknüpfungspunkten die in Streifen `hh864_0000` bestimmt werden konnten, sind das 4 781 Punkte. Anhand dieser Anzahl wird nun von der Bündelausgleichungssoftware die Verteilung der Orientierungspunkte festgelegt. Es wird dabei eine variable Orientierungspunktdistanz (vOPD) mit OPD_{min} = 1 s verwendet (siehe Abschnitt 3.1.2). Als Mindestanzahl von Verknüpfungspunkten zwischen zwei Orientierungspunkten hat sich VP_{min} = 50 als sinnvoll erwiesen (Spiegel, 2007) und wird somit auch hier verwendet. Für den Streifen `hh864_0000` ergeben sich dadurch 202 Orientierungspunkte, denn die Aufnahmelänge des Streifens beträgt 220,7 s. Daraus resultiert eine mittlere Orientierungspunktdistanz von 1,092 s. Für den ersten Durchlauf des ersten Schritts der Bündelausgleichung ergibt sich die in Tabelle 4.4 aufgeführte Anzahl an Beobachtungen und Unbekannten. Jeder Verknüpfungspunkt führt zu drei Unbekannten und liefert, abhängig von der Anzahl der Bilder in denen er beobachtet wurde, sechs bis zehn Beobachtungen. Für jeden Orientierungspunkt kommen jeweils sechs Beobachtungen und sechs Unbekannte für die Elemente der äußeren Orientierung hinzu und ebenso viele einmal pro Streifen, sowohl für den Bias als auch für die Drift.

	Beobachtungen	**Unbekannte**
4 781 Verknüpfungspunkte	46 094	14 343
202 Orientierungspunkte	1 212	1 212
Bias und Drift	12	12
Gesamt	**47 318**	**15 567**

Tabelle 4.4. Anzahl Beobachtungen und Unbekannte bei der Einzelstreifenausgleichung des Streifens `hh864_0000`

Für das Ergebnis der Ausgleichung ist die Gewichtung der unterschiedlichen Beobachtungen im stochastischen Modell (siehe Abschnitt 3.1.3) entscheidend: Für die Angabe zur Präzision der Bildbeobachtungen wurde bei den Entwicklungen zur Verknüpfungspunktbestimmung eine Standardabweichung von 1 µm, also 0,14 Pixel, pro Koordinate empirisch bestimmt und wird hier übernommen (Schmidt, 2008). Die anderen Standardabweichungen entsprechen denen, die bei der Entwicklung der Bündelausgleichung Verwendung fanden (Spiegel, 2007). Dabei entsprechen die Werte von 28 mgon für die direkt beobachteten Lagewinkel den Angaben vom ESOC (Hechler und Yáñez, 2000). Durch diese recht großen Werte können sich die Winkel innerhalb des Orbits recht frei ändern. Die relativen Positionen der Orientierungspunkte dagegen können sich nicht verändern, da ihre direkten Beobachtungen mit Null gewichtet sind.

Um eine Verschiebung des gesamten Streifens zuzulassen, werden für die Pseudobeobachtungen der Biasparameter ebenfalls sehr große Werte von 1 000 m angegeben. Der Einfluss dieser Pseudobeobachtungen steht bei der absoluten Positionierung des Streifens in Konkurrenz zu dem Einfluss der Höhendifferenzen, deren Pseudobeobachtungen mit einer Standardabweichung von 100 m eingeführt werden. Außerdem wird noch eine zeitabhängige Drift für die Z-Richtung zugelassen, indem deren Pseudobeobachtung mit 0,01 m/Bildzeile gewichtet wird. In Tabelle 4.5 wird ein Überblick über die verwendeten Standardabweichungen gegeben:

Verknüpfungspunkte:	Bildkoordinaten:	σ_{x,P_i}	1 µm
		σ_{y,P_i}	1 µm
Zusätzliche Beobachtungen:	Position:	$\sigma_{[X,Y,Z],O_m}$	0
	Lage	$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],O_m}$	28 mgon
Systematische Abweichungen:	Bias:	$\sigma_{[X,Y,Z],B_s}$	1000 m
		$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],B_s}$	0
	Drift:	$\sigma_{[X,Y],D_s}$	0
		σ_{Z,D_s}	0,01 m/l
		$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],D_s}$	0
Passinformation	Höhendifferenzen:	σ_{H,P_i}	100 m

Tabelle 4.5. Stochastisches Modell bei der Einzelstreifenausgleichung: A-priori-Standardabweichungen der Beobachtungen

Durch die Elimination von Ausreißern reduziert sich die Anzahl der Verknüpfungspunkte im Verlauf der Bündelausgleichung auf 4 381 Punkte. Dadurch ergeben sich für den letzten Durchlauf 46 329 Beobachtungen und 14 417 Unbekannte. Die resultierenden Orientierungsdaten (aOD) werden in der anschließenden Evaluierung mit den ursprünglichen, nominellen Orientierungsdaten (nOD) verglichen.

Evaluierung

Für die Evaluierung der Orientierungsdaten werden rund 35 000 Punkte verwendet, die in den Level-3-Bildern, ebenso wie die Verknüpfungspunkte, bestimmt worden sind. Für diese Punkte wird, wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, nun jeweils mit den nOD und den aOD ein separater Datensatz von Objektpunkten berechnet.

In Abbildung 4.6 sind die Punktwolken dieser beiden Datensätze dargestellt: In der Mitte sind sie entsprechend ihrer VSF-Werte eingefärbt; Rechts werden die MDiff-Werte zur Einfärbung genutzt. Links in der Abbildung wird mit der Färbung der Punkte die Geländehöhe beschrieben, um die Topographie des Streifens darzustellen.

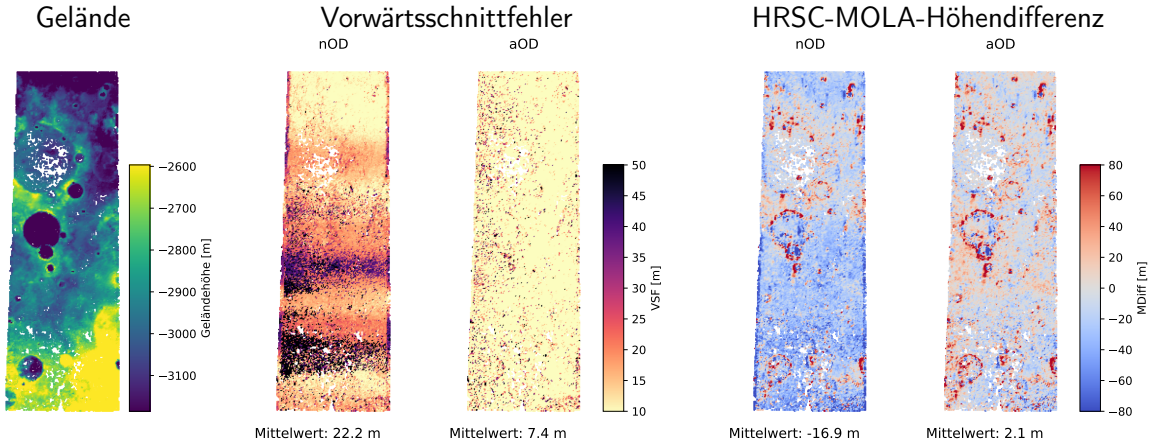


Abbildung 4.6. Evaluierung der Ergebnisse der Einzelstreifenausgleichung für HRSC-Streifen `hh864_0000`: Topographie, Vorwärtsschnittfehler (VSF) und HRSC-MOLA-Höhendifferenz (MDiff); jeweils nominelle (nOD) und ausgeglichene (aOD) Orientierungsdaten im Vergleich

In den nOD sind quer zur Flugrichtung verlaufende Bereiche zu erkennen, in denen die VSF-Werte auf 50 m und mehr steigen. In den aOD sind diese Effekte nicht mehr sichtbar. Hier sind lediglich vereinzelt Punkte mit hohem VSF erkennbar. Die Blaufärbung in der Abbildung der MDiff-Werte für die nOD weist auf eine systematische Abweichung der HRSC-Punkte vom MOLA-DGM hin, die im unteren Teil des Streifens etwas deutlicher hervortritt. Geländedetails, wie beispielsweise der Krater in der Mitte des Streifens, sind im MOLA-DGM aufgrund der geringen Auflösung (463 m) nicht abgebildet. Diese Geländedetails fallen daher in den Abbildungen der Höhendifferenzen zwischen MOLA-DGM und den höher aufgelösten HRSC-Punkten durch größere Abweichungen (rot/blau) auf.

Als Zusammenfassung der Evaluierung ist in Tabelle 4.6 das arithmetische Mittel des Vorwärtsschnittfehlers und der Höhendifferenz über jeweils alle Punkte der beiden Punktwolken angegeben:

	nOD	**aOD**
mVSF [m]	22,1	7,3
mMDiff [m]	-16,9	2,0

Tabelle 4.6. Mittelwerte der Qualitätsmaße (VSF, MDiff) über alle Punkte aus der Evaluierung der Orientierungsdaten (nOD, aOD) von Streifen `hh864_0000`

Die Reduktion des mVSF von 22,1 m auf 7,3 m quantifiziert eine deutliche Verbesserung der Präzision der Orientierungsdaten und entspricht einer Verbesserung um den Faktor 3. Bezogen auf die Auflösung der Daten (20,5 m) liegt nach der Bündelausgleichung des Streifens nun ein Orientierungsdatensatz mit Subpixelgenauigkeit vor, welcher die Anforderungen für die Erstellung der Level-4-Daten erfüllt. Auch bezogen auf die Anpassung der Daten an das MOLA-DGM ergibt sich eine deutliche Verbesserung: Der Absolutbetrag der mMDiff reduziert sich um 14,9 m.

4.2.2. Schwingungen in den Mars-Express-Orientierungsdaten

Die systematische Auswertung weiterer Daten hat gezeigt, dass bei einigen HRSC-Streifen Schwingungen vorhanden sind (Bostelmann und Heipke, 2011). Diese wirken sich negativ auf die Präzision der Objektpunkte aus. In den Abbildungen der VSF sind diese Effekte deutlich an wellenartigen Strukturen zu erkennen (siehe Abbildung 4.7).

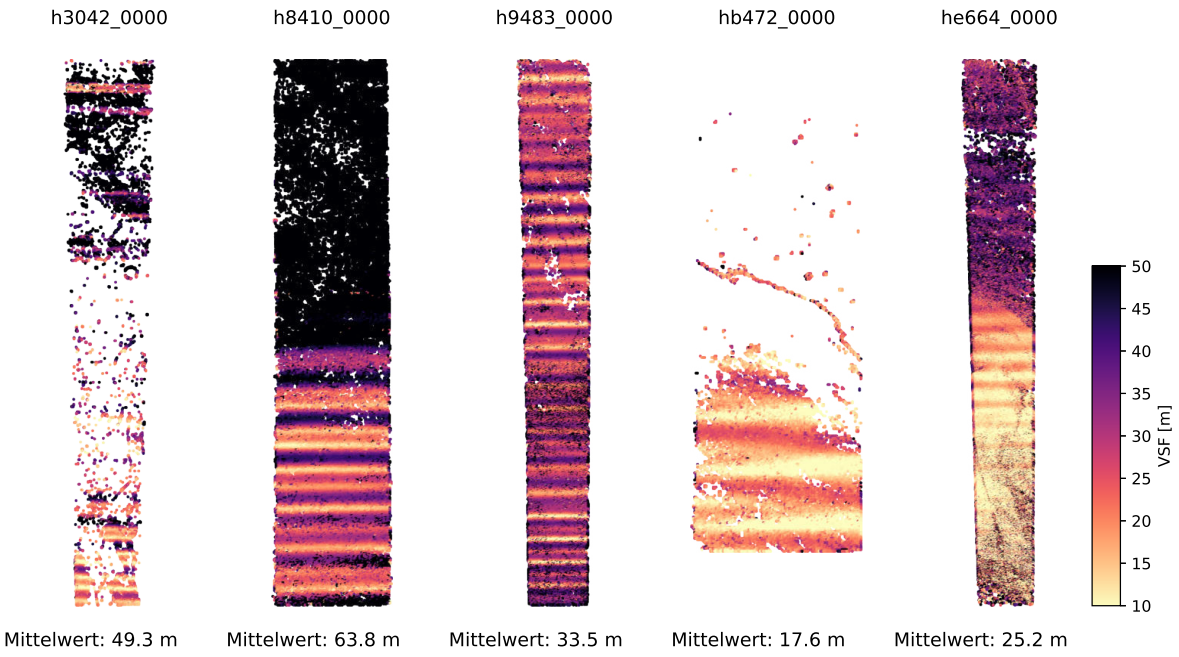


Abbildung 4.7. Beispiele für HRSC-Streifen, deren Punktgenauigkeit durch Schwingungen in den Bilddaten gemindert wird, die in den nominellen Orientierungsdaten (nOD) nicht berücksichtigt sind

Das Auftreten der Schwingungen im ausgewerteten HRSC-Datensatz ist weder zeitlich noch örtlich auf einen bestimmten Bereich konzentriert. Die Schwingungen zeigen sich nicht nur in den Abbildungen des VSF, sondern sind bei einigen Streifen auch in den MDiff-Abbildungen zu erkennen (siehe Abbildung 4.8). Ursächlich für die Schwingungen sind mechanische Bewegungen von Teilen der *Mars-Express*-Sonde. In Frage kommen dabei vor allem die Solarpanele, sowie die MARSIS-Antennen. Verursacht durch Steuerungsmanöver können die Schwingungen bis über 10 min andauern (Gwinner et al., 2016). Die Frequenz der immer wieder auftretenden Schwingungen liegt dabei, über den Verlauf der Mission hinweg, konstant bei etwa 0,12 Hz. Frühere Bündelausgleichungsansätze lieferten bei betroffenen Streifen keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da die standardmäßig verwendete Orientierungspunktdistanz (OPD) von 10 s nicht ausreichte, um die Schwingungen mit den Parametern der äußeren Orientierung zu beschreiben (Gwinner et al., 2010).

Erst eine Reduktion der OPD auf 2 s, welches etwa der doppelten Nyquist-Frequenz zur Beschreibung der Schwingungen entspricht, ermöglichte zumeist eine vollständige Korrektur der Schwingungen (Bostelmann und Heipke, 2011).

Da die Orientierungspunkte die Stützstellen der Lagrange-Polynome zur Interpolation der äußeren Orientierung definieren, müssen diese dicht genug angeordnet sein, damit die hochfrequenten Schwingungen geeignet modelliert werden können. Bei der Platzierung der Orientierungspunkte, wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, bestimmen drei Einflüsse, wie dicht beieinander die Orientierungspunkte jeweils platziert werden können: erstens die Wahl zwischen dem Ansatz mit einer konstanten OPD und dem mit einer variablen OPD; zweitens die Stellgrößen (VP_{min} und OPD_{min}); sowie drittens die Verteilung der vorliegenden Verknüpfungspunkte. Die Verteilung der Verknüpfungspunkte, die sich durch die Verknüpfungspunktbestimmung ergeben, hängt von zwei Faktoren ab: erstens, von der gewählten Gitterweite bei der Definition der Kandidatenpunkte und zweitens von der Erfolgsquote bei der Bildzuordnung. Die Erfolgsquote hängt von den für die Bildzuordnung gewählten Stellgrößen und vom Bildinhalt ab (Schmidt, 2008). Beides wird in dieser Arbeit nicht verändert. Deshalb ergibt sich eine direkte Abhängigkeit zwischen der gewählten Gitterweite und der resultierenden Verteilung der Verknüpfungspunkte. Die gewählte Gitterweite beeinflusst somit indirekt die Anzahl der Orientierungspunkte und damit das Ergebnis der Bündelausgleichung. Dieser Einfluss soll im Folgenden anhand einer Testreihe untersucht werden. Dabei werden auch die Unterschiede zwischen einer kOPD und einer vOPD dargestellt. Zunächst wird dieses anhand eines einzelnen Streifens qualitativ betrachtet und anschließend mittels eines großen Datensatzes quantitativ ausgewertet. Die Stellgrößen zur Platzierung der Orientierungspunkte werden beibehalten ($VP_{min} = 50$, $OPD_{min} = 1\,s$).

Einfluss der Verknüpfungspunktdichte auf die Modellierung der Schwingungen

Abbildung 4.8 zeigt den Streifen `h3148_0000`, dessen Bündelausgleichung dadurch erschwert wird, dass sowohl Schwingungen als auch Bereiche mit geringer Textur auftreten. Ganz links ist eine Orthoprojektion des Nadirbildes zu sehen, daneben sind die Objektpunkte aus der Evaluierung der nOD jeweils farbcodiert dargestellt. Zur Einfärbung wurde die Geländehöhe, der VSF und die MDiff verwendet. Das Nadirbild liegt im MPF1 vor und hat eine Auflösung von 12,5 m. Die anderen vier panchromatischen Bilder liegen im MPF2 mit einer Objektpixelgröße von 25,0 m vor.

Im Norden und Süden des Gebiets, das auf der Aufnahme zu sehen ist, befinden sich sehr ebene und homogene Bereiche. Da die Bilder dort eine entsprechend geringe Textur aufweisen, ist in diesen Bereichen mit wenig erfolgreichen Punktzuordnungen zu rechnen. Über die gesamte Länge des Streifens ist außerdem die typische wellenartige Variation des VSF deutlich sichtbar. Im nördlichen Teil des Streifens ist der VSF insgesamt deutlich höher. Im Mittel liegt der VSF der Objektpunkte für diesen Streifen bei 20,3 m. Auch in der Visualisierung der MDiff-Werte sind im mittleren Bereich des Streifens leichte Schwingungen zu erkennen. Dadurch ist exemplarisch gezeigt, dass sich die Schwingungen in den Orientierungsdaten nicht nur auf die Genauigkeit, sondern auch auf die Höhe der Objektpunkte auswirken.

In Abbildung 4.9 ist der nördliche Teil des Nadirbildes vergrößert abgebildet. Es sind jeweils die erfolgreich zugeordneten Verknüpfungspunkte in grün überlagert. Von links nach rechts erhöht sich die über den Bildern angegebene Anzahl der Gitterpunkte. Sie bezieht sich auf die Kandidaten, die bei der Verknüpfungspunktbestimmung (für den ganzen Streifen) vorgegeben wurden. In Bereichen mit hohen Grautwertvariationen führt die kleiner werdende Gitterweite zu einer Steigerung der Punktdichte. In Bereichen mit schwacher Textur werden nur vereinzelt mehr Punkte gefunden.

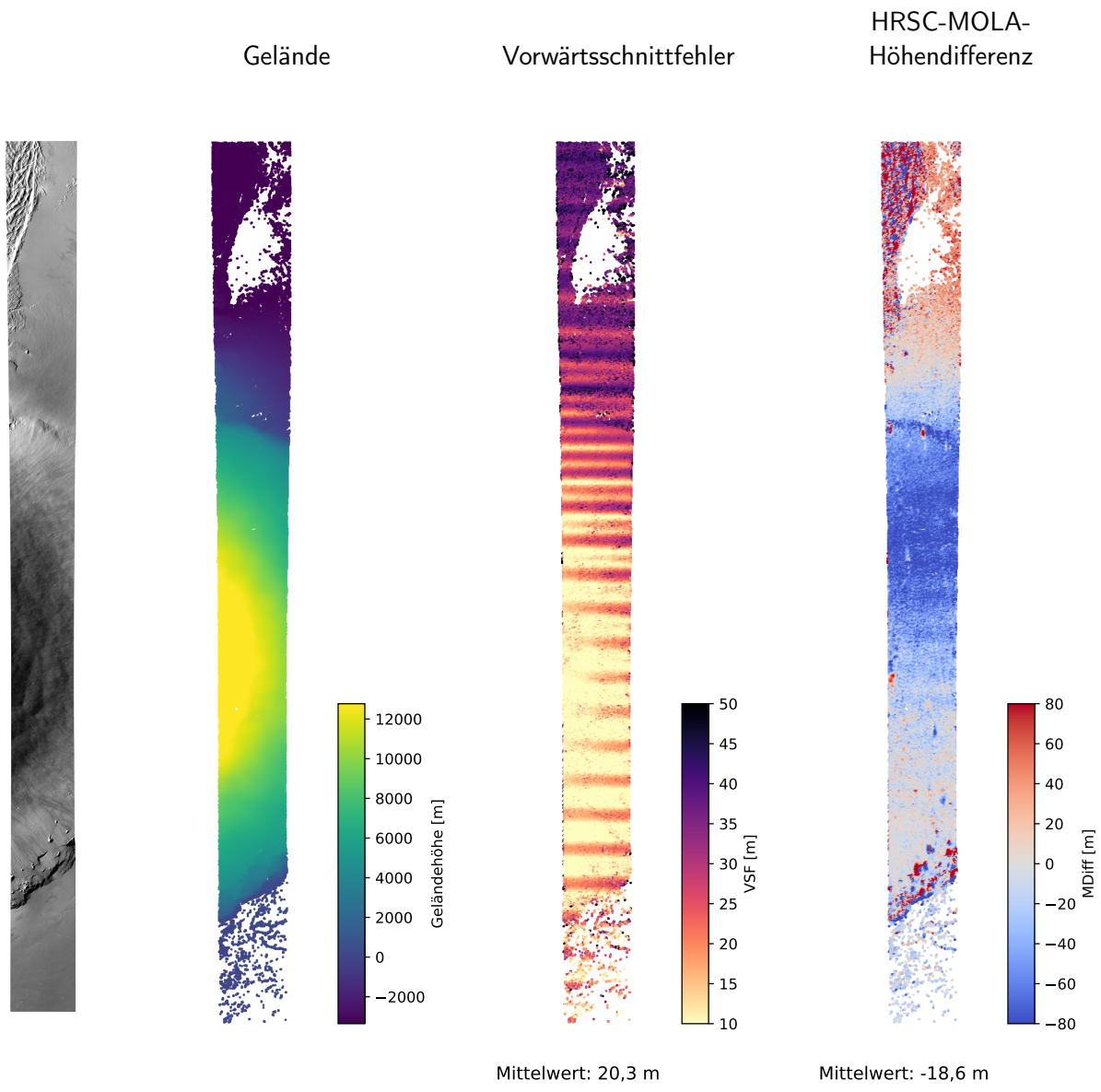


Abbildung 4.8. Evaluierung der nominellen Orientierungsdaten (nOD) des HRSC-Streifens `h3148_0000`

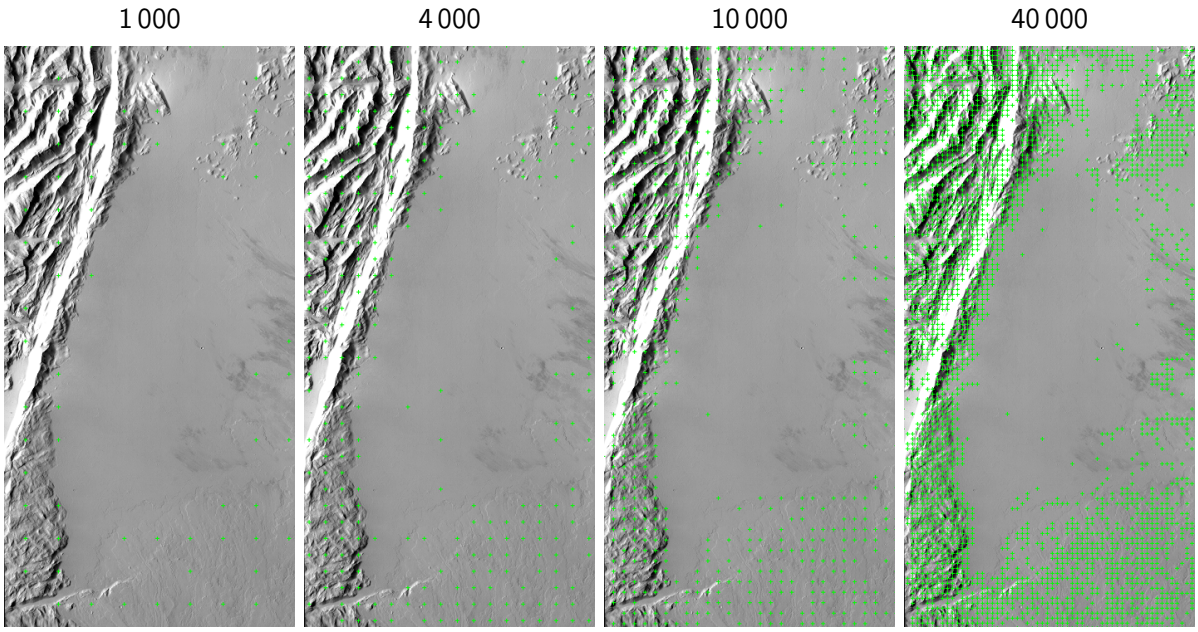


Abbildung 4.9. Verknüpfungspunktdichte im nördlicher Teil des HRSC-Streifens `h3144_0000`; abhängig von der oben angegebenen Anzahl der Kandidatenpunkte

Für die folgenden Untersuchungen werden für diesen Streifen insgesamt 16 Datensätze mit Verknüpfungspunkten erzeugt, wobei die vorgegebene Anzahl der Kandidatenpunkte zwischen 1 000 und 40 000 variiert. Mit jedem Datensatz wird die Bündelausgleichung und Evaluierung je zweimal durchgeführt, einmal mit einer konstanten Distanz zwischen den Orientierungspunkten (kOPD) und einmal mit einer variablen Distanz (vOPD).

Die Anzahl der Verknüpfungspunkte des jeweiligen Datensatzes führt in beiden Fällen zu einer entsprechend angepassten Anzahl an Orientierungspunkten. Mit steigender Anzahl der Orientierungspunkte reduziert sich entsprechend die mittlere Distanz zwischen diesen (siehe Abbildung 4.10). Dabei ist die Anzahl der Orientierungspunkte bei einer kOPD deutlich geringer und die Distanz zwischen den Punkten entsprechend größer. Mit einer vOPD ist bereits bei etwa 3 000 Verknüpfungspunkten eine mittlere OPD von unter 2 s. erreicht. Mit einer kOPD fällt die mittlere OPD erst bei über 30 000 Verknüpfungspunkten unter 10 s.

Wie viele Verknüpfungspunkte benötigt werden, um die vorhandenen Schwingungen modellieren und korrigieren zu können, wird nun für jeden Datensatz anhand der Evaluierung der jeweiligen Orientierungsdaten untersucht. In Abbildung 4.11 sind links Abbildungen des VSF für einige Datensätze dargestellt, die mit einer kOPD ausgewertet wurden.

Es ist, unabhängig von der Anzahl der Verknüpfungspunkte, keine Reduzierung der VSF zu erkennen. Bei Verwendung einer vOPD ergeben sich für dieselben Verknüpfungspunkte die rechts gezeigten Abbildungen. Mit 1 000 Verknüpfungspunkten und 45 Orientierungspunkten (siehe Tabelle 4.8) ist bereits ein Teil der Schwingungen korrigiert. Mit steigender Verknüpfungspunktanzahl lassen sich dann auch in den Bereichen mit weniger Punkten die Schwingungen korrigieren; zuerst im südlichen und anschließend im nördlichen Bereich. Ab etwa 11 000 Verknüpfungspunkten sind keine Schwingungen mehr erkennbar.

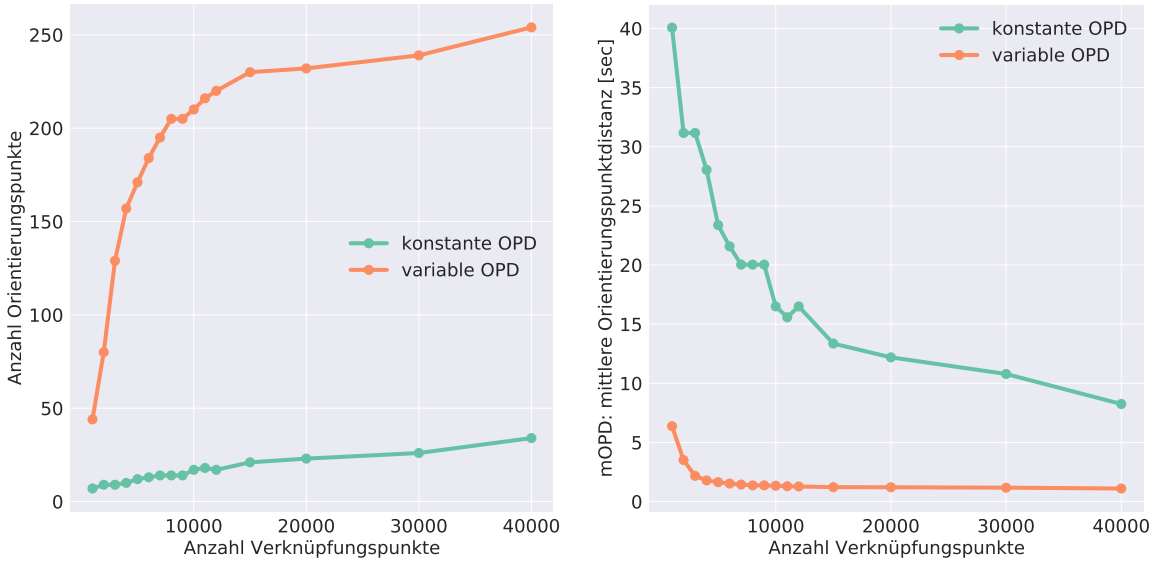


Abbildung 4.10. Einfluss der Anzahl der Verknüpfungspunkte auf die Anzahl der Orientierungspunkte (links), sowie auf die mittlere Orientierungspunktdistanz (rechts); konstante und variable Orientierungspunktdistanz im Vergleich für HRSC-Streifen `h3148_0000`

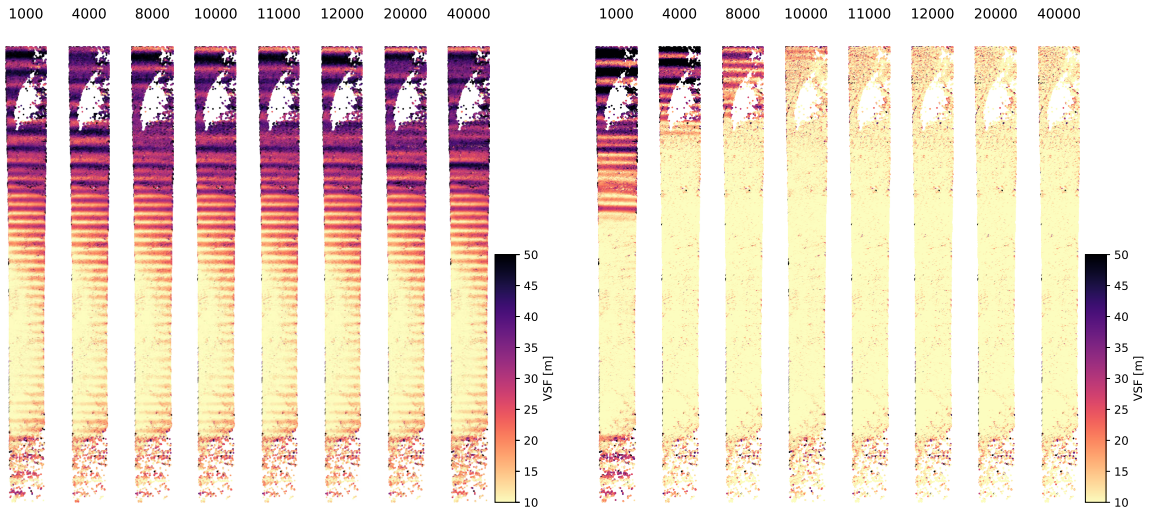


Abbildung 4.11. Einfluss der Anzahl der Verknüpfungspunkte auf den Vorwärtsschnittfehler (VSF) für 8 ausgewählte Verknüpfungspunkt-Datensätze; konstante und variable Orientierungspunktdistanz im Vergleich für HRSC-Streifen `h3148_0000`

Quantifizieren lässt sich die Korrektur der Schwingungen, indem der VSF über alle Objektpunkte, welche zur Evaluierung verwendet werden, gemittelt wird. Dieser mVSF ist in Abbildung 4.12 für alle 32 Datensätze in Abhängigkeit von der Anzahl der Verknüpfungspunkte, die für die Bündelausgleichung verwendet werden, dargestellt.

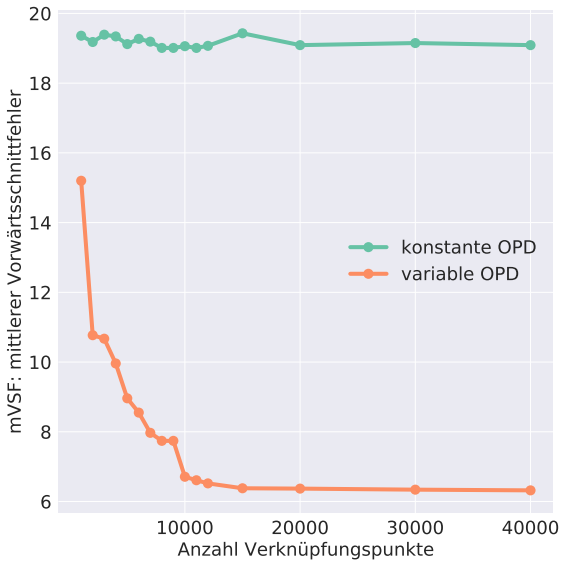


Abbildung 4.12. Einfluss der Anzahl der Verknüpfungspunkte auf den mittleren Vorwärtsschnittfehler (mVSF); konstante und variable Orientierungspunktdistanz im Vergleich für HRSC-Streifen `h3148_0000`

Wie bereits in Abbildung 4.11 erkennbar, reduziert sich der mVSF mit einer konstanten OPD nicht. Mit variabler OPD ist im Bereich zwischen 1 000 und 10 000 Verknüpfungspunkten eine deutliche Reduktion des mVSF erkennbar.

An diesem Beispiel wird der klare Vorteil der variablen OPD deutlich. In Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8 sind für ausgewählte Datensätze die relevanten Zahlen zum direkten Vergleich gegenübergestellt.

Anz. Kandidatenpunkte:	1 000	4 000	8 000	10 000	11 000	12 000	20 000	40 000
Anz. Verknüpfungspunkte:	713	2 892	6 383	7 133	7 909	8 756	14 504	31 646
Anz. Orientierungspunkte:	7	10	14	17	18	17	23	34
mittlere OPD [s]	40,1	28,1	20,0	16,5	15,6	16,5	12,2	8,2
mittlerer VSF [m]	19,4	19,3	19,0	19,1	19,0	19,1	19,1	19,1

Tabelle 4.7. Einfluss der Verknüpfungspunktanzahl bei **konstanter** Orientierungspunktdistanz (kOPD)

Anz. Kandidatenpunkte:	1 000	4 000	8 000	10 000	11 000	12 000	20 000	40 000
Anz. Verknüpfungspunkte:	713	2 892	6 383	7 133	7 909	8 756	14 504	31 646
Anz. Orientierungspunkte:	44	157	205	210	216	220	232	254
mittlere OPD [s]	6,4	1,8	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1
mittlerer VSF [m]	15,2	10,0	7,7	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3

Tabelle 4.8. Einfluss der Verknüpfungspunktanzahl bei **variabler** Orientierungspunktdistanz (vOPD)

Aus der jeweils gleichen Anzahl an Kandidaten- und Verknüpfungspunkten ergeben sich unterschiedlich viele Orientierungspunkte, obgleich die Mindestanzahl an Verknüpfungspunkten, die zwischen zwei Orientierungspunkten gefordert wird, in beiden Fällen mit $VP_{min} = 50$ festgelegt ist. Kann die Distanz zwischen den Orientierungspunkten variabel an die verfügbaren Verknüpfungspunkte angepasst werden, sind mehr Orientierungspunkte möglich: In Bereichen mit ausreichender Punktdichte kann die OPD sehr kurz gewählt werden, die Mindestanzahl wird trotzdem erreicht. Gleichzeitig kann in Bereichen mit geringer Punktdichte die OPD so groß verwendet werden, dass auch dort die Mindestanzahl erreicht wird. Mit einer konstanten OPD ist diese Trennung zwischen den Bereichen nicht möglich.

Außerdem wird an dieser Testreihe deutlich, dass auch bei Streifen wie diesem, in denen Bereiche mit geringer Textur vorhanden sind, eine relativ geringe Anzahl an Verknüpfungspunkten ausreicht, sofern die vOPD verwendet wird. Das oben vorgeschlagene Verhältnis, von Anzahl der Bildzeilen zu Anzahl der Verknüpfungspunkte $= 1/4$, ist auch für diesen Streifen angemessen. Aus den 72 264 Bildzeilen des Streifens `h3148_0000` ergeben sich 18 066 Kandidatenpunkte und daraus, entsprechend der Zuordnungsquote von 70 %, 12 700 Verknüpfungspunkte. Wird die Bündelausgleichung mit einer solchen Anzahl an Verknüpfungspunkten gerechnet, ergeben sich Verbesserungen für die Orientierungsdaten, deren Evaluierung in Tabelle 4.9 zusammengefasst dargestellt ist.

	nOD	**aOD**
mVSF [m]	20,3	6,3
mMDiff [m]	-18,6	2,6

Tabelle 4.9. Mittelwerte der Qualitätsmaße (VSF, MDiff) über alle Punkte aus der Evaluierung der Orientierungsdaten (nOD, aOD) von Streifen `h3148_0000`

Ebenso wie für das hier dargestellte Beispiel wurden für weitere Streifen, in denen Schwingungen vorlagen, vergleichbare Testreihen durchgeführt. Ein Vorteil der vOPD wurde dann festgestellt, wenn wie in dem obigen Beispiel einige Bereiche des Streifens nur eine geringe Anzahl an Verknüpfungspunkten aufweisen, während in anderen Bereichen ausreichend viele vorhanden sind. In diesen Fällen können mit der vOPD, zumindest in den Bereichen mit ausreichend vielen Verknüpfungspunkten, genügend Orientierungspunkte verwendet werden, um die Schwingungen in der Bündelausgleichung zu korrigieren. Bei der Verwendung einer kOPD verhindern die Bereiche mit geringer Verknüpfungspunktanzahl eine ausreichende Anzahl an Orientierungspunkten im gesamten Streifen.

Systematische Korrektur der Schwingungen

In vorigen Arbeiten wurden alle 3 828 zum damaligen Zeitpunkt verfügbaren HRSC-Streifen durch eine visuelle Auswertung der VSF-Abbildungen auf Schwingungen untersucht (Bostelmann und Heipke, 2016). Dabei fanden sich 515 Streifen, in denen Schwingungen erkennbar waren. Da diese Anzahl mehr als 10 % des globalen Datensatzes entspricht, sollte die Behebung dieser Störungen nicht außer acht gelassen werden, insbesondere da bei der systematischen Erstellung großer HRSC-Mosaike nur selten auf Streifen verzichtet werden kann. Um unerwünschte Lücken in den Mosaiken zu verhindern, ist es daher wichtig, dass möglichst viele der auftretenden Schwingungen korrigiert und die betroffenen Streifen anschließend für die Blöcke verwendet werden können.

Mit dem Ansatz variabel angeordneter Orientierungspunkte, wird in dieser Arbeit eine Möglichkeit zur Korrektur dieser Störungen vorgestellt. Im vorigen Abschnitt wurde der Ansatz bereits erfolgreich validiert und soll im Folgenden auch an allen 515 Datensätzen evaluiert werden.

Für jeden der 515 Streifen erfolgt zunächst eine Einzelstreifenausgleichung mit einer kOPD. Die resultierenden Orientierungsdaten werden mit aODk bezeichnet und zusammen mit den jeweiligen nOD verglichen. Dadurch entstehen zwei mal 515 mVSF-Werte. Diese werden genutzt, um die Streifen in 2 m breite Klassen einzuteilen. Die sich daraus ergebenden Häufigkeitsverteilungen sind in Abbildung 4.13 als zwei überlagerte Histogramme dargestellt.

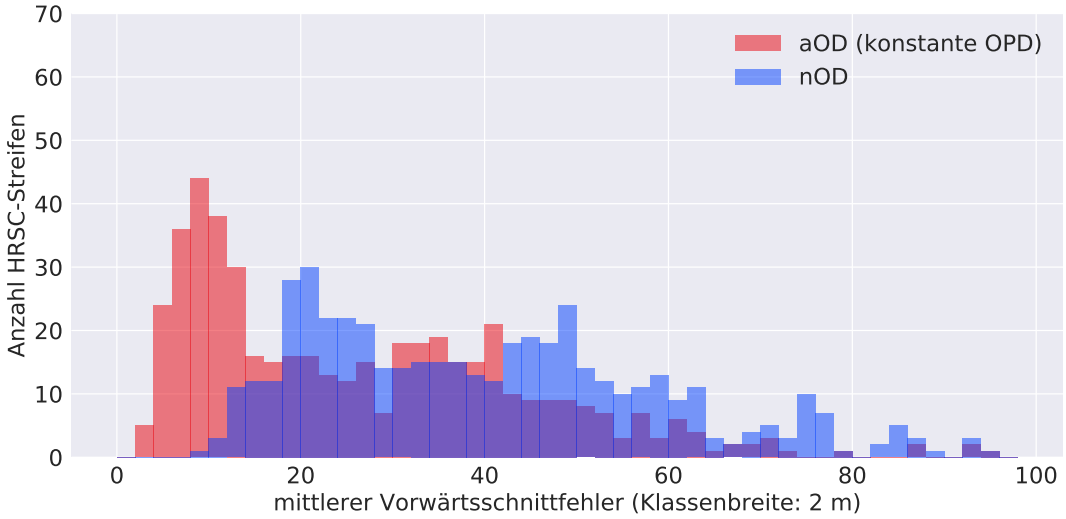


Abbildung 4.13. Mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF): Histogramm über 515 HRSC-Streifen; blau: nominelle Orientierungsdaten vor der Ausgleichung (nOD); rot: ausgeglichene Orientierungsdaten (aOD) nach einer Einzelstreifenausgleichung mit **konstanter** Orientierungspunktdistanz (kOPD)

Für die niedrigeren mVSF-Klassen ergeben sich für die aODk deutlich höhere Häufigkeiten als für die nOD. Dieser Anstieg ist durch Datensätze begründet, in denen über die gesamte Länge des Streifens eine ausreichende Anzahl an Verknüpfungspunkten erzielt wird und somit die Schwingungen auch mit einer kOPD korrigierbar waren. Allerdings verbleiben auch große Häufigkeiten für Klassen oberhalb von 30 m. Hier konnten die Schwingungen durch die Bündelausgleichung größtenteils nicht korrigiert werden.

Zum Vergleich wird nun ein weiterer, dritter Orientierungsdatensatz für alle 515 Streifen erzeugt. Diesmal wird in der Bündelausgleichung allerdings eine vOPD verwendet und jeweils der mVSF berechnet. Daraus ergibt sich das in Abbildung 4.14 grün dargestellte Histogramm, ebenfalls in überlagerter Darstellung mit dem blauen Histogramm für die nOD. Hier fallen nun deutlich mehr Streifen in die Klassen mit einem niedrigen mVSF. Streifen mit einem mVSF oberhalb von 40 m sind kaum vorhanden. Der Median des mVSF für die 515 Streifen liegt mit einer kOPD bei 22,5 m. Werden die Orientierungspunkte mit einer variablen Distanz entlang des Streifens verteilt, liegt er bei 13,6 m. Eine visuelle Auswertung der VSF-Abbildungen hat ergeben, dass mit einer kOPD für 239 der 515 Streifen die Schwingungen vollständig korrigiert werden konnten. Mit einer vOPD war dies in 507 Fällen möglich.

Teilt man für jeden Streifen den mVSFn durch den mVSFa, also jeweils den mittleren Vorwärtsschnittfehler, der mit den nOD bzw. oAD aus der Evaluierung resultiert (vgl. Abschnitt 3.2.4), ergibt sich ein Verbesserungsfaktor. Dieser kann zur Beschreibung einer möglichen Genauigkeitssteigerung der Orientierungsdaten durch die Bündelausgleichung verwendet werden und ist als relativer Wert unabhängig von den jeweiligen Auflösungen der Bilddaten.

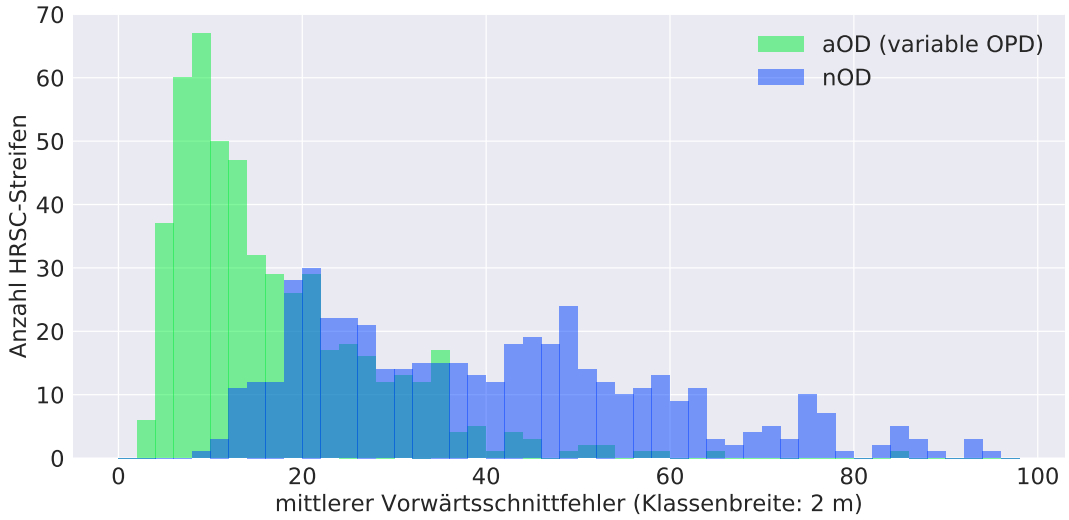


Abbildung 4.14. Mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF): Histogramm über 515 HRSC-Streifen; blau: nominelle Orientierungsdaten vor der Ausgleichung (nOD); grün: ausgeglichene Orientierungsdaten (aOD) nach einer Einzelstreifenausgleichung mit **variabler** Orientierungspunktdistanz (vOPD)

Berechnet man für jeden der 515 Streifen diesen Verbesserungsfaktor für die Orientierungsdaten beider Varianten der Ausgleichung (aODk, aODv), ergeben sich die Histogramme, die in Abbildung 4.15 überlagert dargestellt sind. Die Klassenbreite wurde mit 0.1 festgelegt.

Mit den aODk-Daten ergibt sich für viele der Streifen lediglich ein Verbesserungsfaktor leicht über 1, also nur eine geringe Reduktion des mVSF. In einigen Fällen lag sogar eine Erhöhung des mVSF vor, sodass diese Streifen den Klassen mit einem Verbesserungsfaktor kleiner 1 zugeordnet werden. Mit den aODv-Daten wird für viele Streifen eine deutlich höhere Verbesserung erreicht. Für rund 40 % der Streifen liegt der Verbesserungsfaktor zwischen 2 und 3, für je 30 % oberhalb bzw. unterhalb dieses Bereichs. Der Median des Verbesserungsfaktors liegt mit den aODk-Daten bei rund 1.6, mit den aODv-Daten bei 2.6.

Fazit

Die Auswertung der 515 Streifen, in denen Schwingungen erkannt wurden, hat gezeigt, dass mit einer variablen Orientierungspunktdistanz (OPD) eine deutlich größere Verbesserung der Orientierungsdaten erreicht werden kann, als es mit einer konstanten OPD möglich ist. Ebenso konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung einer variablen OPD die gewählte Verknüpfungspunktanzahl ausreicht, um gute Ergebnisse zu erzielen. Dieses ist besonders für die im nächsten Abschnitt beschriebene, systematische Verarbeitung des globalen HRSC-Datensatzes aus praktischen Gründen relevant: Die Anzahl der Verknüpfungspunkte beeinflusst entscheidend die benötigten Rechnerressourcen und Laufzeiten. Das gilt sowohl für die Verknüpfungspunktbestimmung als auch für die Bündelausgleichung.

Bei der Bündelausgleichung erhöht eine größere Anzahl an Verknüpfungspunkten außerdem die Anzahl der Orientierungspunkte (siehe Abbildung 4.10) und damit maßgeblich die benötigten Arbeitsspeicherkapazitäten und Prozessorzeiten. Aus praktischer Sicht ist bei der Verarbeitung des globalen HRSC-Datensatzes die Anzahl der Verknüpfungspunkte also möglichst klein zu halten. Die gewählte Verknüpfungspunktanzahl ($= 1/4$ der Anzahl der Bildzeilen) stellt einen gut handhabbaren Wert dar.

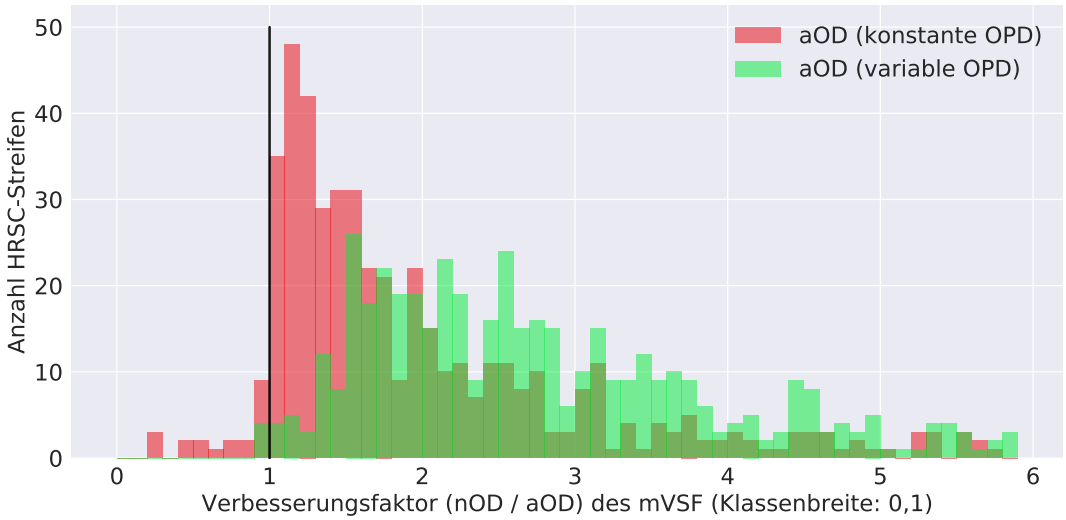


Abbildung 4.15. Verbesserungsfaktor (nOD / aOD) des mittleren Vorwärtsschnittfehler (mVSF): Histogramm über 515 HRSC-Streifen; rot: ausgeglichene Orientierungsdaten (aOD) nach einer Einzelstreifenausgleichung mit **konstanter** Orientierungspunktdistanz (kOPD); grün: mit **variabler** Orientierungspunktdistanz (vOPD); (Höhere Werte entsprechen einer größeren Verbesserung)

Wie in diesem Abschnitt gezeigt werden konnte, reicht die Anzahl an Verknüpfungspunkten auch bei schwierigen Streifen aus, um etwaige Schwingungen zu korrigieren.

4.2.3. Globale Einzelstreifenausgleichung

Insgesamt standen für die durchgeführten Experimente zur globalen Einzelstreifenausgleichung 4 418 HRSC-Datensätze zur Verfügung (siehe Abschnitt 4.1.2). Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse, die im vorigen Abschnitt 4.2.2 erläutert wurden, wurde mit jedem dieser Streifen eine Einzelstreifenausgleichung durchgeführt, wie sie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben ist: Die Anzahl der Gitterpunkte, als Kandidaten für die Verknüpfungspunkte, wurde entsprechend einem $1/4$ der jeweiligen Anzahl an Bildzeilen gewählt. Für die Interpolation der äußeren Orientierung wurden die Orientierungspunkte mit einer variablen Distanz in Abhängigkeit der Verknüpfungspunkte angeordnet.

In 96 Fällen führte der gewählte Ansatz zu keinen Ergebnissen. Die Gründe sind unterschiedlich: Meistens haben Wolken oder Sandstürme in Bildern die Verknüpfungspunktbestimmung verhindert, manchmal konnte der Ansatz nicht mit großen Datenlücken umgehen. Die nachfolgenden statistischen Auswertungen beziehen sich daher auf die 4 322 Streifen (97,8 % des ursprünglichen Datensatzes), für die Ergebnisse erzielt werden konnten. Zunächst werden die Ergebnisse der Verknüpfungspunktbestimmung für jeden Streifen anhand der Zuordnungsquote beurteilt. Dieser Anteil erfolgreich zugeordneter Verknüpfungspunkte an der ursprünglichen Menge der Kandidatenpunkte hängt im Wesentlichen von der jeweils vorliegenden Bildinformation ab. Bilder mit hohem Kontrast und viel Textur liefern hier eine hohe Quote (rechts in Abbildung 4.16). Bei wenig Textur und geringem Kontrast ist die Quote niedriger (links in Abbildung 4.16). In Abbildung 4.17 ist das Histogramm der Zuordnungsquote über alle 4 322 Streifen dargestellt. Die Häufigkeiten sind relativ gleichmäßig über alle Klassen verteilt, mit einem leichten Anstieg in den höheren Wertebereichen. Entsprechend liegt der Median bei einer Zuordnungsquote von 57 %. Durch die flache Verteilung der Daten im Histogramm kann die Heterogenität der HRSC-Daten bezüglich der Bildinformation bestätigt werden.

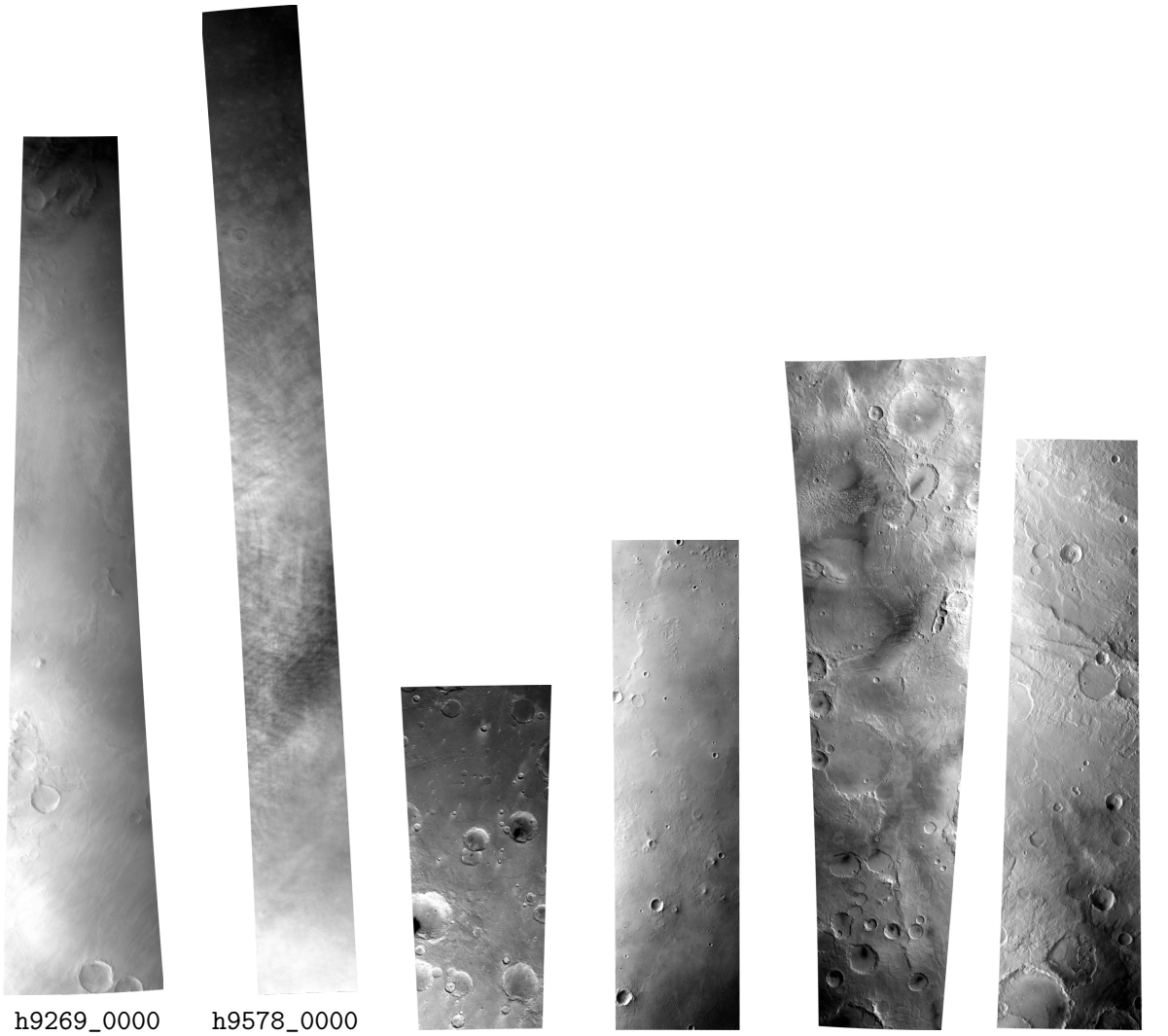


Abbildung 4.16. Zuordnungsquote bei der Verknüpfungspunktbestimmung (Verknüpfungspunkte / Kandidatenpunkte); Von links nach rechts je zwei Beispiele für HRSC-Streifen mit 10 %, 50 % und 90 % erfolgreich zugeordneter Punkte; (Die Streifen sind mit unterschiedlichem Maßstab dargestellt)

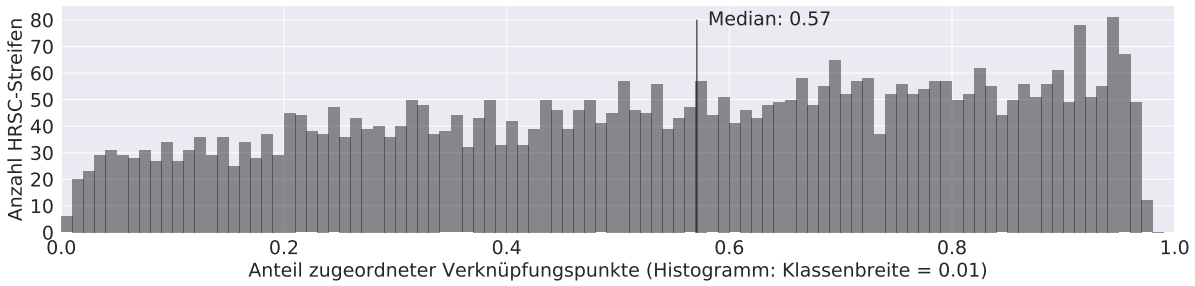


Abbildung 4.17. Zuordnungsquote bei der Verknüpfungspunktbestimmung (Verknüpfungspunkte / Kandidatenpunkte); Histogramm über alle 4 322 HRSC-Streifen; Median: 57 %

Das Histogramm in Abbildung 4.18, welches die Verteilung der Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Streifen darstellt, weist dagegen eine deutliche Häufung im Bereich zwischen 3 000 und 10 000 auf. Rund 60 % der Streifen werden in die entsprechenden Klassen in diesem Bereich eingeordnet. Bei jeweils 20 % der Streifen wurden weniger bzw. mehr Punkte zugeordnet. Hier wirkt sich die Länge der Streifen (siehe Abbildung 4.2) auf die absoluten Zahlen aus: Die Anzahl der Verknüpfungspunkte ist das Produkt aus der Zuordnungsquote und der Anzahl der Gitterpunkte. Letztere ist linear von der Anzahl der Bildzeilen abhängig.

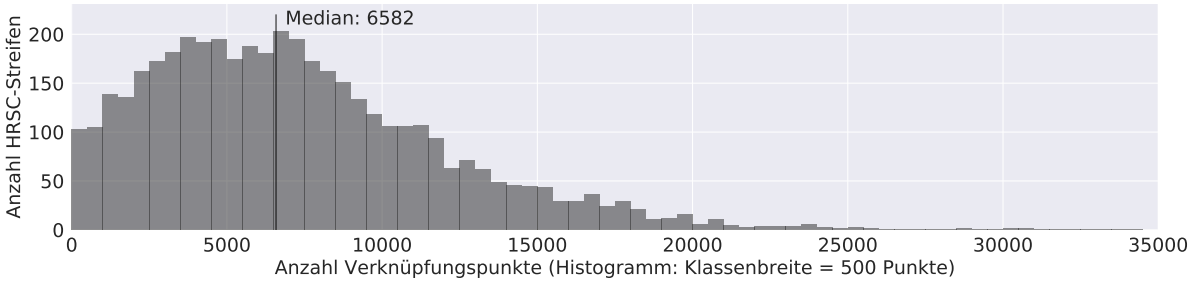


Abbildung 4.18. Anzahl der Verknüpfungspunkte; Histogramm über alle 4 322 HRSC-Streifen; Median: 6 582

Zur Beurteilung der Ergebnisse der Einzelstreifenausgleichung wird für die 4 322 Streifen des globalen Datensatzes jeweils der mVSFn und der mVSFa berechnet. In den Histogrammen in Abbildung 4.19 ist eine deutliche Verschiebung der Häufigkeiten in die Klassen der niedrigen Mittelwerte zu beobachten: Vor der Ausgleichung lag der mVSF für die Hälfte der Streifen oberhalb von 29,4 m. Nach der Ausgleichung liegt der Median bei 16,4 m.

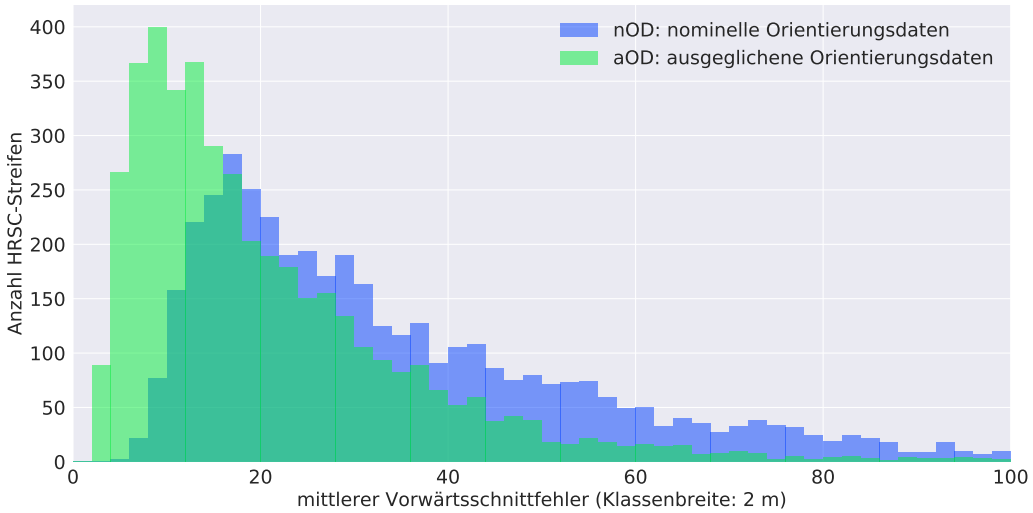


Abbildung 4.19. Mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF): Histogramm über alle 4 322 HRSC-Streifen; blau: nominelle Orientierungsdaten vor der Ausgleichung (nOD); grün: ausgeglichene Orientierungsdaten (aOD) nach einer Einzelstreifenausgleichung

Auch das Histogramm in Abbildung 4.20 stellt eine Häufigkeitsverteilung der Streifen des globalen Datensatzes dar. Als Merkmal zur Einteilung in 0,1 große Klassen wird hier der Verbesserungsfaktor (nOD / aOD) verwendet.

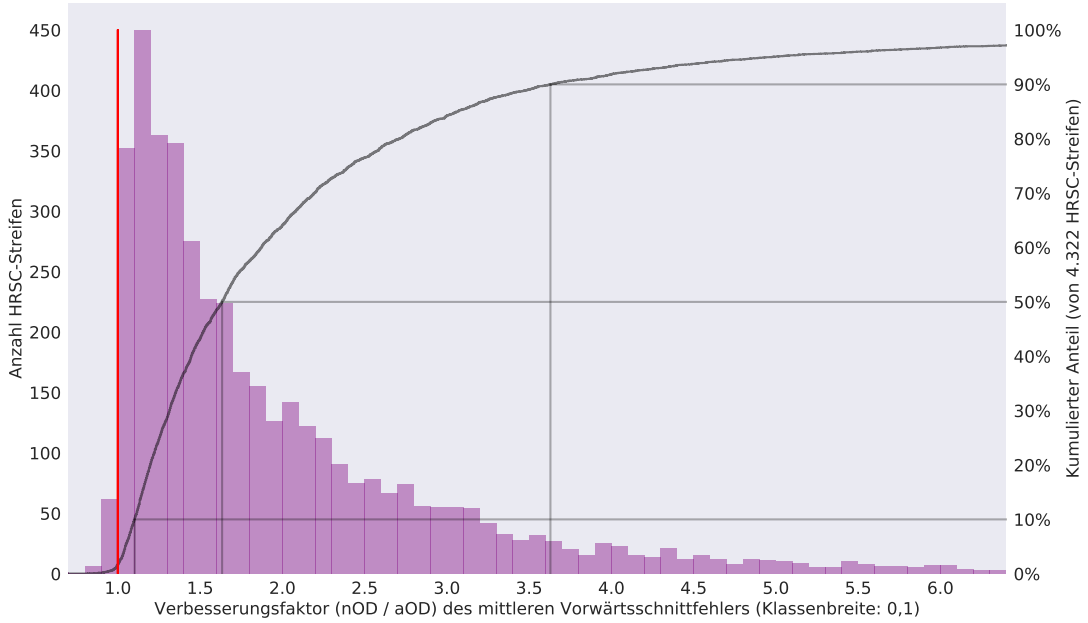


Abbildung 4.20. Verbesserungsfaktor nOD / aOD des mittleren Vorwärtsschnittfehler (mVSF): Histogramm über alle 4 322 HRSC-Streifen; schwarze Kurve, rechte Vertikalachse: kumulierter Anteil; markiert: 10 %- 50 %- und 90 %-Quantil

Ergänzend ist die kumulierte Häufigkeit des Verbesserungsfaktors für die 4 322 Streifen prozentual als schwarze Linie abgebildet. An ihr lassen sich der Median und andere Quantile direkt ablesen. Der Median sowie das 10- und 90-%-Quantil sind jeweils hervorgehoben. Der Median für den Verbesserungsfaktor liegt bei rund 1,6. Jeweils 10 % der Datensätze haben einen Verbesserungsfaktor von mehr als 3,6 und weniger als 1,1. Ein Verbesserungsfaktor niedriger als 1.0 (links der roten Linie in Abbildung 4.20) und damit eine Verschlechterung der Orientierungsdaten durch die Bündelausgleichung bezüglich des mVSF, tritt in 70 Fällen auf. Dies entspricht 1,6 % der Daten. Unterhalb von 0,9 liegt der Verbesserungsfaktor bei 8 der 4 322 HRSC-Streifen. Der Grund dafür ist in sieben Fällen eine sehr schlechte Bildqualität und in einem Fall ein Problem mit der Dateistruktur.

Für die 4 322 Streifen wird jeweils auch die mMDiff unter Verwendung der nOD und aOD berechnet und für die Einteilung der Streifen in zwei überlagerte Histogramme verwendet (siehe Abbildung 4.21). Die Klassenbreite beträgt dabei 2 m. Insgesamt ist eine deutliche Verbesserung durch die Ausgleichung zu erkennen. Die Häufigkeit der Streifen mit mehr als 10 m MDiff nimmt deutlich ab, während die Anzahl an Streifen mit geringeren mMDiff-Werten entsprechend zunimmt. An beiden Histogrammen ist eine Verschiebung der häufigsten Klassen vom Nullpunkt zu erkennen (siehe rechts in Abbildung 4.21). Für die aOD erfolgt diese Verschiebung leicht in den positiven mMDiff-Bereich mit einem Median bei 1,3 m, für die nOD etwas deutlicher in die Klassen der negativen mMDiff-Bereiche mit dem Median bei -9,6 m. Diese Verschiebungen entsprechen einer globalen systematischen Abweichung der HRSC-Objektpunkte vom MOLA-DGM. Als Begründung dafür kommen sowohl systematische Höhenfehler im MOLA-DGM, als auch die Parameter der inneren Orientierung der HRSC in Frage. Beides wird aktuell im HRSC-Team untersucht und geht über den Umfang dieser Arbeit hinaus.

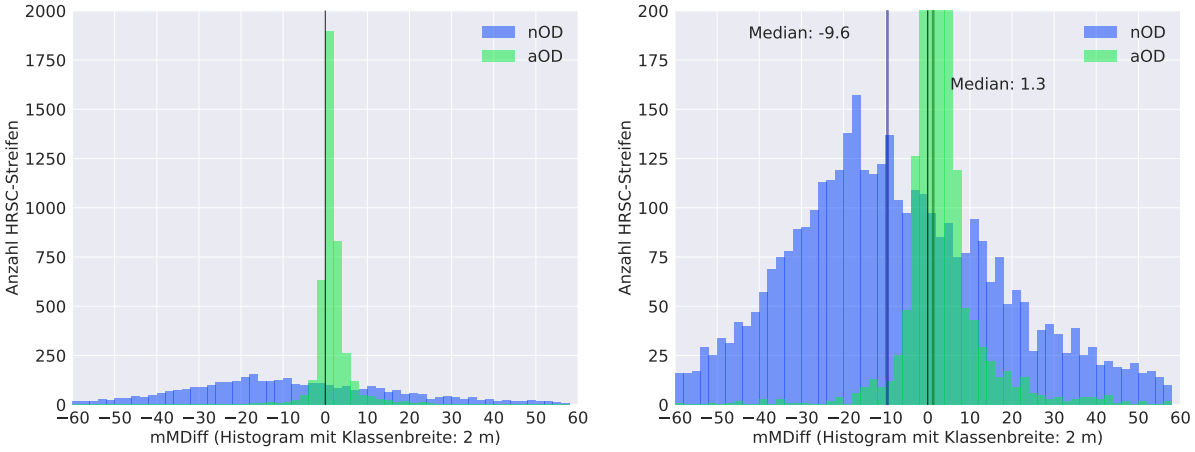


Abbildung 4.21. Mittlerere HRSC-MOLA-Differenz (mMDiff): Histogramm über alle 4 322 HRSC-Streifen; rechts: skalierte Vertikalachse zur besseren Darstellung der nOD-Daten

Um für jeden Streifen die Veränderung der mMDiff zu bewerten, werden jeweils die Differenzen der Absolutwerte für die mMDiff-Werte berechnet. Dabei wird der Wert der nOD vom Wert der aOD abgezogen. Positive Werte bedeuten somit eine entsprechende Verbesserung der Anpassung an das MOLA-DGM. Negative Werte treten auf, wenn sich die Orientierungsdaten durch die Bündelausgleichung bezüglich der MOLA-DGM-Anpassung verschlechtert haben. Mit einer Klassenbreite von 5 m ist in Abbildung 4.22 das Histogramm über alle 4 322 Streifen für diesen Verbesserungswert dargestellt.

Für 50 % der Daten führt die Bündelausgleichung zu einer Verbesserung von 19,0 m oder mehr. Für je 10 % der Daten liegt die Verbesserung unterhalb von 1,5 m bzw. oberhalb von 68,0 m. Eine Verschlechterung ergibt sich für 276 (6,4 %) der 4 322 Streifen. Größer als 10 m ist die Verschlechterung nur bei 51 Streifen (1,1 %). Bei den wenigen Streifen, bei denen die Einzelstreifenausgleichung eine Verschlechterung der Orientierungsdaten bewirkt hat, kann individuell für jeden Streifen entschieden werden, ob er für die Blockausgleichung geeignet ist. Oft sprechen bei diesen Streifen auch andere Gründe, wie z.B. sehr schlechte Bildqualität oder zu große Datenlücken, gegen eine Verwendung in den Mosaiken.

Fazit

Zusammenfassend kann ein äußerst positives Fazit für die Ergebnisse der Einzelstreifenausgleichung gezogen werden. Der verwendete Ansatz zur Bündelausgleichung liefert für einen Großteil der Daten deutliche Verbesserungen (siehe Tabelle 4.10). Zu beachten ist dabei, dass für einen Teil der Streifen diese Verbesserungen so erheblich waren, dass die Streifen erst mit den neuen Orientierungsdaten (aOD) für die Verwendung als Level-4-Daten oder in den Mosaiken geeignet sind.

Eine individuelle Anpassung der Stellgrößen an die Daten der jeweiligen Streifen war dabei nicht notwendig. Für zukünftige Arbeiten wäre es aber denkbar, für einzelne Streifen einige Stellgrößen anzupassen, um noch bessere Ergebnisse zu erzielen. So könnte beispielsweise eine Erhöhung der Anzahl der Verknüpfungspunkte in Einzelfällen zu besseren Ergebnissen führen. Sinnvoll wäre diese nachgeschaltete Anpassung vor allem in Fällen, in denen Streifen in den jeweiligen Blöcken für die Mosaike nicht durch andere Streifen ersetzt werden können.

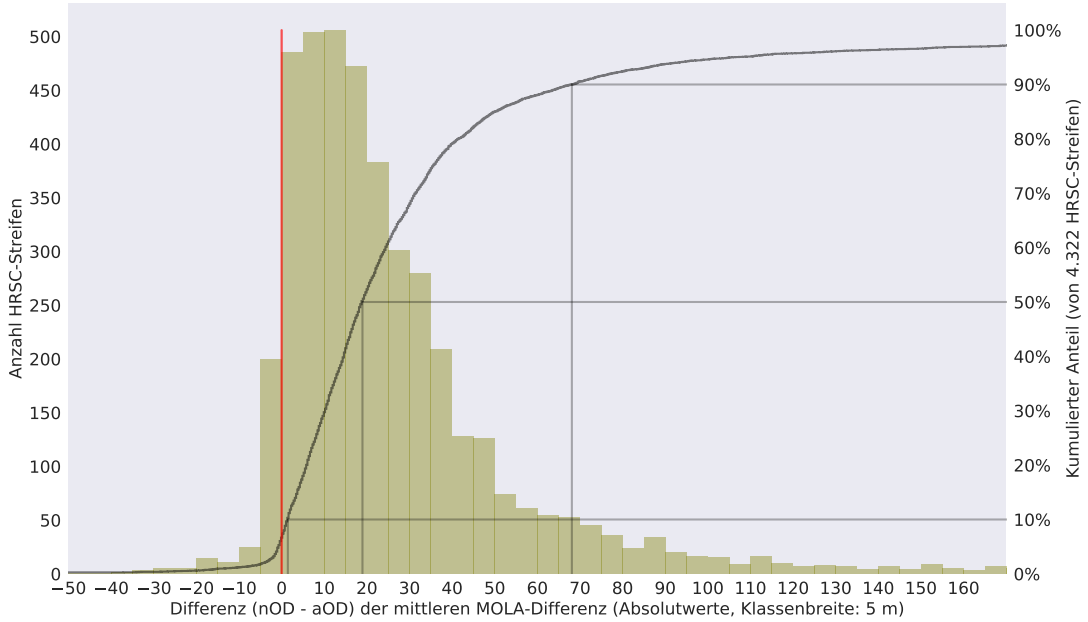


Abbildung 4.22. Differenz (nOD - aOD) der Absolutwerte der mittleren HRSC-MOLA-Differenz (mMDiff): Histogramm über alle 4 322 HRSC-Streifen; schwarze Kurve, rechte Vertikalachse: kumulierter Anteil; markiert: 10 %- 50 %- und 90 %-Quantil

	Streifen	Anteil
Verfügbar	4 419	100,0 %
Ausgewertet	4 322	97,8 %
Verbesserung mVSF	4 252	96,2 %
Verbesserung mMDiff	4 046	93,6 %

Tabelle 4.10. Evaluierungsergebnisse der Einzelstreifenausgleichung des globalen HRSC-Datensatzes

4.3. Blockauswertungen

In diesem Abschnitt werden die Experimente und deren Ergebnisse zu verschiedenen Blockausgleichungen dargestellt. Als Blockausgleichung wird in dieser Arbeit eine Bündelausgleichung bezeichnet, sobald Aufnahmen aus mehr als einem Orbit Verwendung finden (siehe Abschnitt 3.3). Auch für einen (Teil-) Block mit den Bildern aus nur zwei Streifen kann eine Blockausgleichung durchgeführt werden. Die einzeln ausgeglichenen Orientierungsdaten (aOD) als Ergebnisse der systematischen Einzelstreifenausgleichung, welche im vorigen Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, dienen hier jeweils als Eingangsdaten.

4.3.1. Beispiel

Zunächst wird die zweite Stufe des Verfahrens - die Blockausgleichung - anhand eines kleinen Blocks, bestehend aus vier HRSC-Streifen, evaluiert. Dabei soll auch der Unterschied der beiden Varianten der Teilblockstrategie betrachtet werden. Um die Daten und Ergebnisse der Blockausgleichung übersichtlicher darstellen zu können, ist dieser kleine Block besser geeignet als die später betrachteten MC-30-Blöcke. Es handelt sich dabei um den Block, welcher bereits in Abschnitt 3.3.3 zur Veran-

schaulichung der zwei Teilblockvarianten verwendet wurde. Auf Daten und Struktur des Blocks wird nun im Detail eingegangen.

Daten

Die vier Streifen wurden im südöstlichen Teil der MC-11-E Halbkachel aufgenommen. Es handelt sich um `h1183_0000`, `h4350_0001`, `h9435_0009` und `ha468_0000`. Der Bildinhalt der Nadirbilder ist in Abbildung 4.23 links zu sehen; Form und Lage der Streifen lassen sich besser an den rechts dargestellten Umrissen erkennen. Streifen `h4350_0001` ist vergleichsweise kurz (17 064 Bildzeilen). Die von diesem Streifen überdeckte Fläche ist, im Vergleich zu den anderen, etwa doppelt so breit. Letzteres ist, wie auch die geringere Objektpixelgröße, durch eine größere Aufnahmehöhe bedingt.

	`h1183_0000`	`h4350_0001`	`h9435_0009`	`ha468_0000`
Auflösung:	14,0 m	35,7 m	16,7 m	19,4 m
Anzahl Bildzeilen:	97 568	17 064	40 176	33 560
Anzahl Kandidatenpunkte	28 521	4 284	11 428	9 863
Anzahl Verknüpfungspunkte:	9 380	2 291	8 778	8 643
Zuordnungsquote:	33 %	53 %	77 %	88 %
mittlerer VSF mit nOD:	36,3 m	82,5 m	19,0 m	22,4 m
mittlerer VSF mit aOD:	21,4 m	20,9 m	13,7 m	9,6 m
mittlere MDiff mit nOD:	-79,9 m	-13,4 m	-27,2 m	-7,0 m
mittlere MDiff mit aOD:	0,7 m	2,2 m	1,4 m	0,6 m

Tabelle 4.11. Eigenschaften der vier Streifen des kleinen Blocks

Mit 97 568 Bildzeilen ist `h1183_0000` der längste der vier Streifen (siehe Tabelle 4.11). Da aus der Anzahl der Bildzeilen die Gitterweite zur Anordnung der Kandidatenpunkte für die Verknüpfungspunktbestimmung ermittelt wurde, ist deren Anzahl ebenfalls entsprechend hoch (28 521). Allerdings konnten nur aus etwa einem Drittel dieser Punkte erfolgreich Verknüpfungspunkte bestimmt werden. Den größten Anteil zugeordneter Verknüpfungspunkte weist in diesem Block `ha468_0000` mit 88 % auf. Diese deutlich unterschiedlich hohen Zuordnungsquoten finden sich auch in den später gezeigten Ergebnissen der Verknüpfungspunktbestimmung in den Teilblöcken in Abbildung 4.23 wieder.

Ebenso weist die Evaluierung der Orientierungsdaten nach der Einzelstreifenausgleichung im Vergleich zu den globalen Auswertungen in Abschnitt 4.2.3 keine unerwarteten Abweichungen auf. Die Präzision der Daten, gemessen mit dem mVSF, konnte um einen Faktor von 1,3 bis 3,9 gesteigert werden. Die systematische Höhenabweichung vom MOLA-DGM, wie sie vor allem bei `h1183_0000` vorlag, konnte bei allen vier Streifen auf sehr niedrige Werte reduziert werden (siehe unten in Tabelle 4.16). Von beiden Qualitätsmaßen wird erwartet, dass sie sich nach der Blockausgleichung nicht verschlechtern.

Verknüpfungspunktbestimmung in Teilblöcken

Aus der Topologie, Form und Größe der vier Streifen ergeben sich für diesen Block fünf Überlappungen. Wie bereits in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, können daraus zehn P-Teilblöcke und vier M-Teilblöcke gebildet werden. Für jeden dieser Teilblöcke wird das in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Verfahren zur

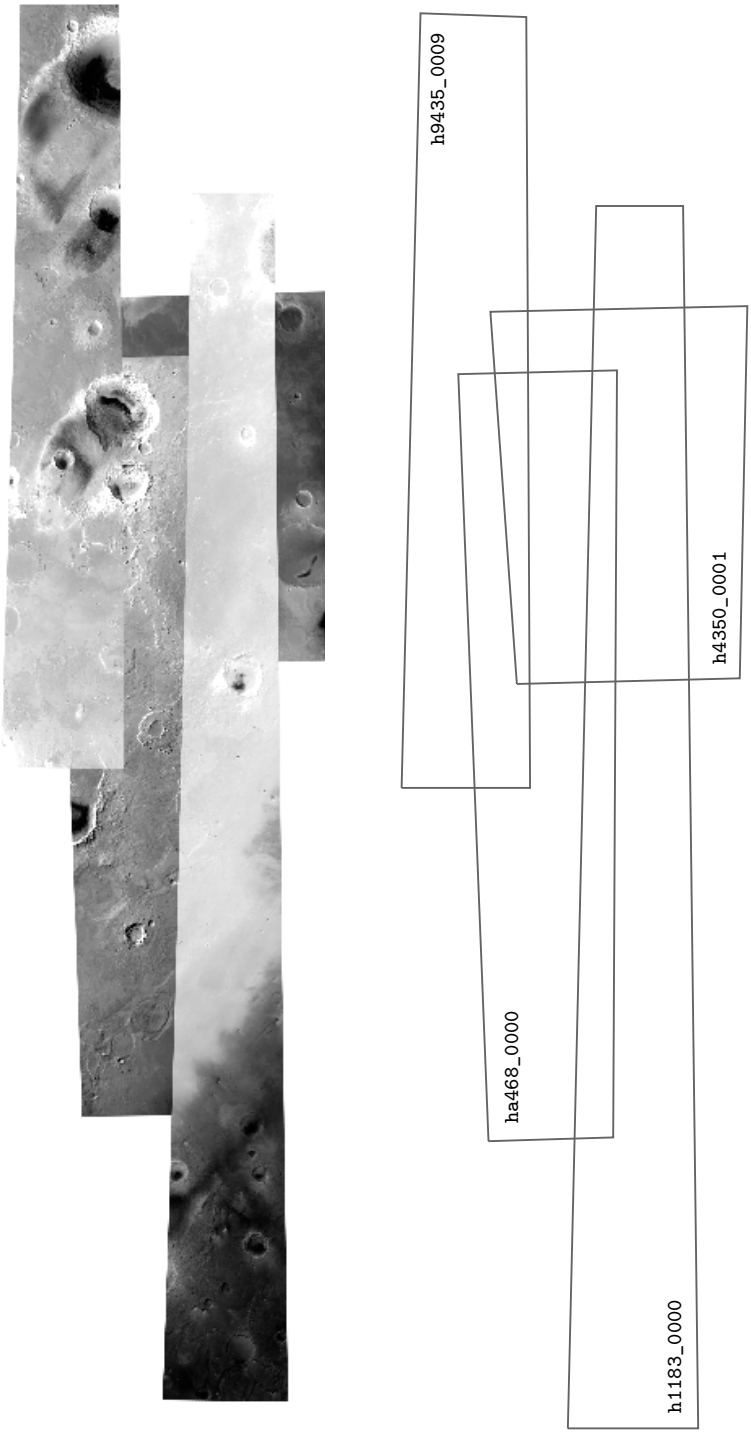


Abbildung 4.23. Kleiner photogrammetrischer Block aus vier HRSC-Streifen: h1183_0000, h4350_0001, h9435_0009 und ha468_0000; links: Orthofotos der Nadir-Bilderstreifen; rechts: Footprints

Verknüpfungspunktbestimmung durchgeführt. Vorher werden zur Vorentzerrung für jeden Teilblock jeweils aus allen Bildstreifen Orthofotos (Level-3a) erstellt. Für jeden der zehn P-Teilblöcke werden - jeweils für jedes Bild der fünf panchromatischen Kanäle in den beiden Streifen - somit zehn Orthofotos erstellt. Bei den vier M-Teilblöcken sind es jeweils 15 bzw. 20 Orthofotos pro Teilblock.

Für die Verknüpfungspunktbestimmung durch die Bildzuordnung in den Level-3a-Bildern wird, sowohl für die P-Teilblöcke als auch für die Variante der M-Teilblöcke, die Gitterweite für die Kandidatenpunkte auf 200 Pixel festgelegt. Dieser Wert wurde empirisch ermittelt. Auf eine Abhängigkeit der Punktdichte von der Länge der Streifen wird verzichtet, da in der Blockausgleichung grundsätzlich nur zwei Orientierungspunkte verwendet werden und damit die Anzahl der Unbekannten weniger abhängig von der Länge des Streifens ist. Eine Anpassung dieser Stellgrößen an einzelne Teilblöcke hat in Experimenten keine positive Auswirkung auf die Ausgleichungsergebnisse gezeigt. Besonders bei größeren Blöcken mit mehreren Hundert Teilblöcken wird eine manuelle Wahl der Gitterweite unpraktikabel. Hier wäre eine regelbasierte oder iterative Bestimmung einer sinnvollen Gitterweite für zukünftige Arbeiten denkbar. Allgemein führten Abstände > 200 Pixel zwischen den Kandidatenpunkten bei Teilblöcken mit sehr geringer Überlappung zu einer zu niedrigen Verknüpfungspunktanzahl. Besonders Teilblöcke, bei welchen nur ein geringer Anteil der Kandidatenpunkte erfolgreich zugeordnet werden konnte, ließen sich nicht mehr miteinander verknüpfen. Eine kleinere Gitterweite und damit eine engmaschigere Verteilung der Kandidatenpunkte führte zu einer größeren Anzahl an Verknüpfungspunkten und ließ die Gesamtzahl der Punkte bei großen Blöcken so sehr ansteigen, dass die derzeitige Implementierung des Verknüpfungspunktfilters in Kombination mit den verfügbaren Rechnerressourcen an ihre Grenzen stieß. Grundsätzlich wird, wie später gezeigt, die Anzahl der Verknüpfungspunkte letztlich durch den Verknüpfungspunktfilter sehr stark reduziert. Dadurch dominiert die Wahl der verwendeten Rasterweite beim Filtern der Punkte den Einfluss auf die Ergebnisse der Blockausgleichung.

Für die Bildzuordnung werden die selben Einstellungen verwendet wie bei den Einzelstreifen (siehe Abschnitt 4.2.1). Die Ergebnisse für den vorliegenden Datensatz werden hier zunächst beispielhaft anhand des P-Teilblocks `h1183_0000 – h4350_0001` betrachtet. Das Nadirbild des Streifens `h1183_0000` wird als Master verwendet. Aus der *Best Ground Sampling Distance* von 14 m ergibt sich für die Erstellung der Level-3a-Bilder eine Objektpixelgröße von 28 m für alle zehn Bilder der beiden Streifen. Mit der festgelegten Gitterweite von 200 Pixeln ergeben sich abhängig von der Größe des Nadirbildes 2 923 Kandidaten für die Verknüpfungspunkte. Aus der paarweisen Zuordnung durch Kreuzkorrelation (vor Anwendung des MI-LSM) zu den neun anderen Bildern des Teilblocks ergibt sich für jedes Bildpaar eine Anzahl erfolgreich zugeordneter Punkte, die in Tabelle 4.12 jeweils angegeben ist.

Die deutlich geringere Anzahl zugeordneter Punkte zu den Bildern des Sekundärstreifens `h4350_0001` lässt sich im Wesentlichen auf drei Gründe zurückführen:

1. Nur rund 27 % der Fläche von `h1183_000` überlappen mit `h4350_0001`.
2. Teile der von beiden Streifen abgebildeten Geländeoberfläche weisen sehr geringe Textur auf. Dieses ist, wie oben bereits erwähnt, auch in der Anzahl der erfolgreich zugeordneten Verknüpfungspunkte der Einzelstreifenausgleichung ersichtlich.
3. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte der beiden Streifen, liegen unterschiedliche Beleuchtungssituationen vor, sodass sich durch Schattenwurf entstandene Bilddetails unterscheiden.

Fasst man die paarweisen Punktzuordnungen zusammen, ergeben sich aus den ursprünglichen 2 923 Kandidatenpunkten insgesamt 1 457 Punkttupel. Dabei variiert die Anzahl der Bildpunkte pro Tupel

Master-Bild	Slave-Bild	Anzahl Punkte
h1183_0000 (ND)	h1183_0000 (P1)	977
h1183_0000 (ND)	h1183_0000 (P2)	1 117
h1183_0000 (ND)	h1183_0000 (S1)	1 144
h1183_0000 (ND)	h1183_0000 (S2)	1 351
h1183_0000 (ND)	h4350_0001 (ND)	59
h1183_0000 (ND)	h4350_0001 (P1)	50
h1183_0000 (ND)	h4350_0001 (P2)	70
h1183_0000 (ND)	h4350_0001 (S1)	44
h1183_0000 (ND)	h4350_0001 (S2)	89

Tabelle 4.12. Paarweise Bildpunktzuordnungen am Beispiel des P-Teilblocks h1183_0000 – h4350_0001

von zwei bis zehn. Da für einige dieser Verknüpfungspunkttupel das MI-LSM nicht konvergiert, reduziert sich die Anzahl erfolgreich zugeordneter Punkte auf 1 153. Diese können in zwei Arten unterteilt werden: Zum einen die für die Blockausgleichung essentiellen Zwei-Streifen-Punkte, die eine Verbesserung der relativen Lage der Streifen zueinander ermöglichen; zum anderen Ein-Streifen-Punkte, welche jeweils nur im Primärstreifen Bildbeobachtungen aufweisen. Diese sind vor allem zur Anpassung an das MOLA-DGM notwendig, da besonders bei kleinen Blöcken, wie diesem Vier-Streifen-Block, die Fläche, in der sich Streifen überlappen und Zwei-Streifen-Punkte vorliegen, oft nur einen geringen Anteil der Gesamtfläche ausmacht. Möglichst weit verteilte Verknüpfungspunkte sind aber zur Anpassung an das MOLA-DGM von Vorteil.

Für den hier betrachteten Teilblock h1183_0000 – h4350_0001 sind es 1 100 Verknüpfungspunkte, welche nur im Primärstreifen (h1183_0000) identifiziert wurden und 53, die in beiden Streifen Bildbeobachtungen aufweisen. Erfahrungsgemäß reichen in den meisten Fällen rund zehn Zwei-Streifen-Punkte aus, um eine Verbesserung der relativen Orientierung der Streifen zueinander zu erreichen. Aus theoretischen Überlegungen kann dies damit begründet werden, dass jeder Punkt bis zu 20 Bildbeobachtungen und nur drei unbekannte neue Parameter beiträgt.

Für die Evaluierung, den Verknüpfungspunktfilter und die folgenden Visualisierungen werden aus den Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte 3D-Objektpunkte berechnet. Dabei werden sowohl Zwei-Strahl-Punkte als auch Punkte mit einem sehr großen Vorwärtsschnittfehler verworfen (als sehr groß gelten dabei Werte, welche die Objektpixelgröße der Level-3a-Bilder um ein Zehnfaches überschreiten). Dadurch kann sich die Anzahl der Punkte nochmals reduzieren. Im Folgenden bezieht sich die Anzahl der Verknüpfungspunkte, wenn nicht anders angegeben, stets auf die Punkte, zu denen auch 3D-Koordinaten berechnet wurden. Für den Teilblock h1183_0000 – h4350_0001 sind dies 972 Punkte. Für die anderen Teilblöcke ist diese reduzierte Anzahl Tabelle 4.13 zu entnehmen.

Es fällt auf, dass bei den Teilblöcken, bei denen h4350_0001 als Primärstreifen das Master-Bild stellt, die Anzahl der Punkte deutlich geringer ist. Dies liegt an der geringeren Auflösung dieses Nadirbildes. In der Summe liegen für den gesamten Block, aufgeteilt in die zehn P-Teilblöcke, insgesamt 7 729 Verknüpfungspunkte vor. Dabei sind 958 Zwei-Streifen-Punkte und 6 711 Ein-Streifen-Punkte.

P-Teilblock	Gitterweite	Kandidaten	KK	LSM	3D	2S
h1183_0000 - h4350_0001	200	2 923	1 457	1 153	972	53
h1183_0000 - ha468_0000	200	2 923	1 509	1 214	1 039	200
h4350_0001 - h1183_0000	200	319	208	190	176	25
h4350_0001 - h9435_0009	200	319	209	197	183	23
h4350_0001 - ha468_0000	200	319	207	187	174	20
h9435_0009 - h4350_0001	200	1 469	1 233	1 097	1 055	148
h9435_0009 - ha468_0000	200	1 469	1 236	1 044	1 004	150
ha468_0000 - h1183_0000	200	1 230	1 123	1 082	1 069	119
ha468_0000 - h4350_0001	200	1 230	1 122	1 036	1 024	80
ha468_0000 - h9435_0009	200	1 230	1 122	1 041	1 030	140
Summe		**13 431**	**9 426**	**8 241**	**7 726**	**958**

Tabelle 4.13. Anzahl der Verknüpfungspunkte pro P-Teilblock: Verwendete Gitterweite; Kandidatenpunkte; Punkttupel durch Bildzuordnung mit Kreuzkorrelation (KK); Punkte mit konvergiertem Least-Square-Matching (LSM); Drei-Strahl-Punkte mit 3D-Koordinate (3D); Zwei-Streifen-Punkte (2S)

M-Teilblock	Gitterweite	Kandidaten	KK	LSM	3D	2S	3S
h1183_0000_200	200	2923	1510	1183	1009	211	16
h4350_0001_200	200	319	210	181	169	50	7
h9435_0009_200	200	1469	1236	1026	986	163	45
ha468_0000_200	200	1230	1123	992	980	247	36
Summe		**5 941**	**4 079**	**3 381**	**3 144**	**671**	**104**

Tabelle 4.14. Anzahl der Verknüpfungspunkte pro M-Teilblock: Verwendete Gitterweite; Kandidatenpunkte; Punkttupel durch Bildzuordnung mit Kreuzkorrelation (KK); Punkte mit konvergiertem Least-Square-Matching (LSM); Drei-Strahl-Punkte mit 3D-Koordinate (3D); Zwei-Streifen-Punkte (2S), Drei-Streifen-Punkte (3S)

Für die vier M-Teilblöcke ist in Tabelle 4.14 die jeweilige Anzahl der Verknüpfungspunkte angegeben. Auch an dieser Stelle fällt die geringere Anzahl an Punkten bei `h4350_0001` auf. Weil auch hier die Nadirbilder jeweils als Master-Bild zur Verteilung der Punkte genutzt werden, ergibt sich jeweils die gleiche Anzahl an Kandidatenpunkten wie bei den entsprechenden P-Teilblöcken. Da jeder Streifen aber nur einmal als Primärstreifen verwendet wird, ist die Gesamtzahl der Punkte hier deutlich geringer.

Insgesamt hat die Verknüpfungspunktbestimmung mit der M-Teilblockvariante für den gesamten Block 3 144 Punkte ergeben. Diese teilen sich in 104 Drei-Streifen-Punkte, 671 Zwei-Streifen-Punkte und 2 369 Ein-Streifen-Punkte auf.

In Abbildung 4.24 ist die Verteilung der Verknüpfungspunkte für die P-Teilblock- und die M-Teilblockvariante gegenüberstellt. Die Punkte sind abhängig von der Anzahl verknüpfter Streifen eingefärbt. Die sichtbaren Lücken in der Verteilung der Punkte treten an denselben Stellen auf, an denen sie auch bei den Verknüpfungspunkten für die Einzelstreifen zu erkennen sind. Dort, wo bei den M-Teilblöcken Drei-Strahl-Punkte (gelb, rechts in Abbildung 4.24) auftreten, ist bei den P-Teilblöcken eine größere Anzahl an Zwei-Strahl-Punkten zu finden (grün, links in Abbildung 4.24).

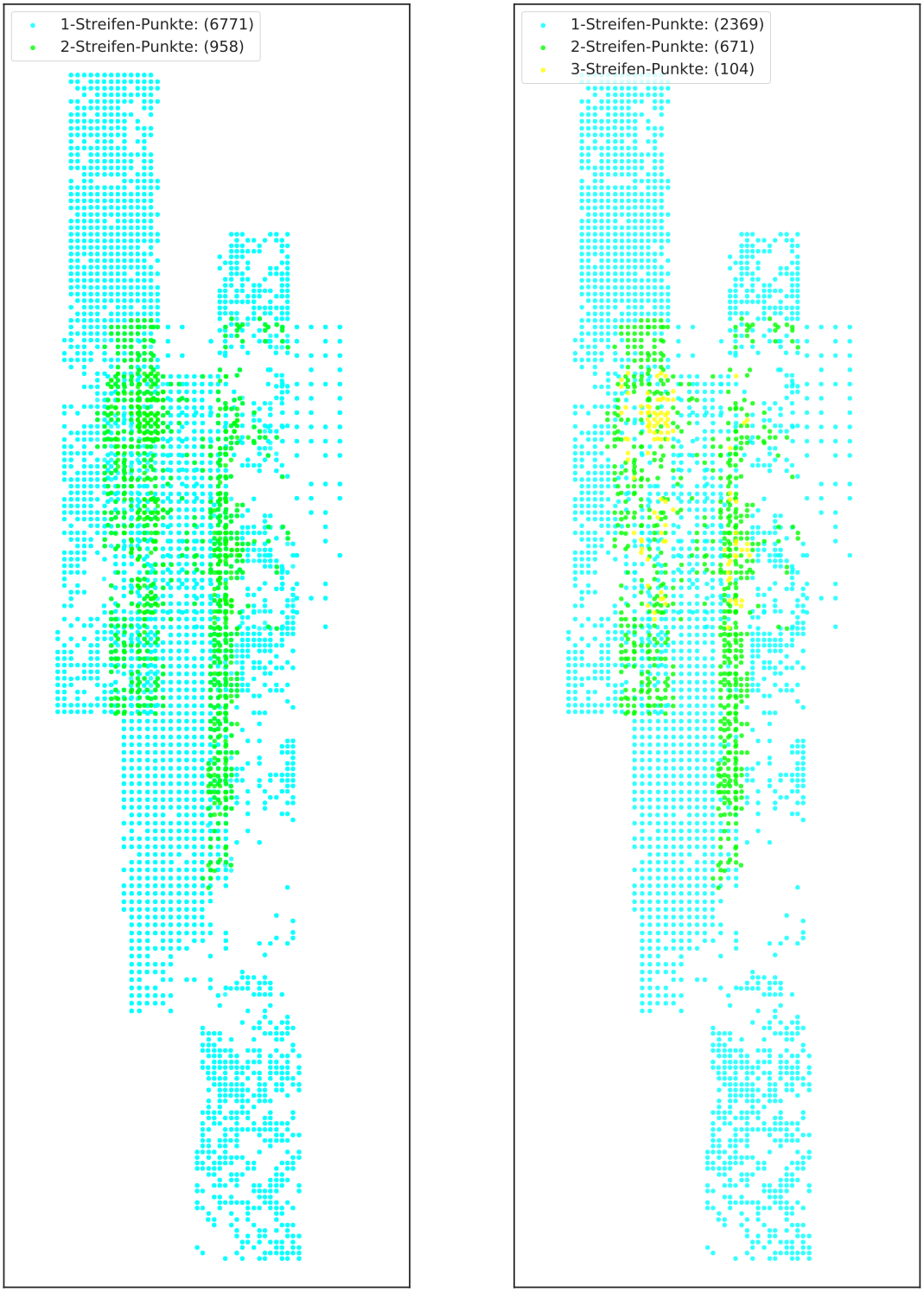
Blockausgleichung

Mit beiden Teilblockvarianten wird die Bündelausgleichung, wie sie in Abschnitt 3.3.5 beschrieben ist, durchgeführt. Auf eine vorige Anwendung des Verknüpfungspunktfilters wird für diesen kleinen Beispielblock verzichtet. Im Vergleich zur Einzelstreifenausgleichung wird das stochastische Modell durch geänderte Standardabweichungen angepasst: Um eine Translation der Streifen im lokalen kartesischen Tangentialsystem zu gewährleisten, ohne dabei eine Verschiebung weg vom MOLA-DGM zuzulassen, wird der Einfluss des MOLA-DGM durch entsprechende Gewichtung der Pseudobeobachtungen erhöht, indem die Standardabweichung von 100 m auf 1 m reduziert wird. Auch den direkten Beobachtungen für die Position der Streifen wird nun in der Blockausgleichung ein - im Vergleich zu den Bildkoordinaten - höherer Einfluss gewährt: Sie werden mit einer A-priori-Standardabweichung von 5 m eingeführt. Dabei ist zu beachten, dass bei der Blockausgleichung die Beobachtungen für die äußere Orientierung aus den aOD stammen. Für die übrigen Beobachtungen werden die Standardabweichungen auf Null gesetzt (siehe Tabelle 3.3).

Verknüpfungspunkte:	Bildkoordinaten:	σ_{x,P_i}	1 µm
		σ_{y,P_i}	1 µm
Zusätzliche Beobachtungen:	Position:	$\sigma_{[X,Y,Z],O_m}$	0
	Lage	$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],O_m}$	0
Systematische Abweichungen:	Bias:	$\sigma_{[X,Y,Z],B_s}$	5 m
		$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],B_s}$	0
	Drift:	$\sigma_{[X,Y,Z],D_s}$	0
		$\sigma_{[\varphi,\omega,\kappa],D_s}$	0
Passinformation	Höhendifferenzen:	σ_{H,P_i}	1 m

Tabelle 4.15. Stochastisches Modell - Blockausgleichung: A-priori-Standardabweichungen d. Beobachtungen

Als Ergebnis der beiden Blockausgleichungen entstehen zwei Varianten von neuen Orientierungsdaten. Diese werden für die folgende Evaluierung mit bODp für die P-Teilblöcke und bODm für die M-Teilblöcke bezeichnet.



P-Teilblöcke M-Teilblöcke

Abbildung 4.24. Verteilung der Verknüpfungspunkte aus allen Teilblöcken des Blocks; farbliche Unterteilung anhand der Anzahl verknüpfter Streifen

Evaluierung

Zunächst soll anhand des Vorwärtsschnittfehlers (VSF) überprüft werden, ob sich die Objektpunktgenauigkeit der Streifen durch die Blockausgleichung verändert hat. Dazu werden die Verknüpfungspunkte aus der Einzelstreifenausgleichung verwendet. Die höhere Anzahl an Verknüpfungspunkten erlaubt ein flächendeckenderes Bild bei der Auswertung. Wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, werden die vier unterschiedlichen Orientierungsdatensätze (nOD, aOD, bODp und bODm) genutzt, um jeweils die Punkte aller Streifen gemeinsam auszuwerten.

Abbildung 4.25 zeigt die 29 068 Punkte der vier Streifen eingefärbt anhand ihres VSF. Die untere Grenze der Farbskala wurde entsprechend der Minimalwerte gewählt, die üblicherweise für den VSF erreicht werden. Die obere Grenze von 50 m bezieht sich auf die Auflösung der Level-5 Daten. Dieser Standardwert für die Größe der DGM-Pixel sollte bei der DGM-Generierung als Vorwärtsschnittfehler nicht überschritten werden.

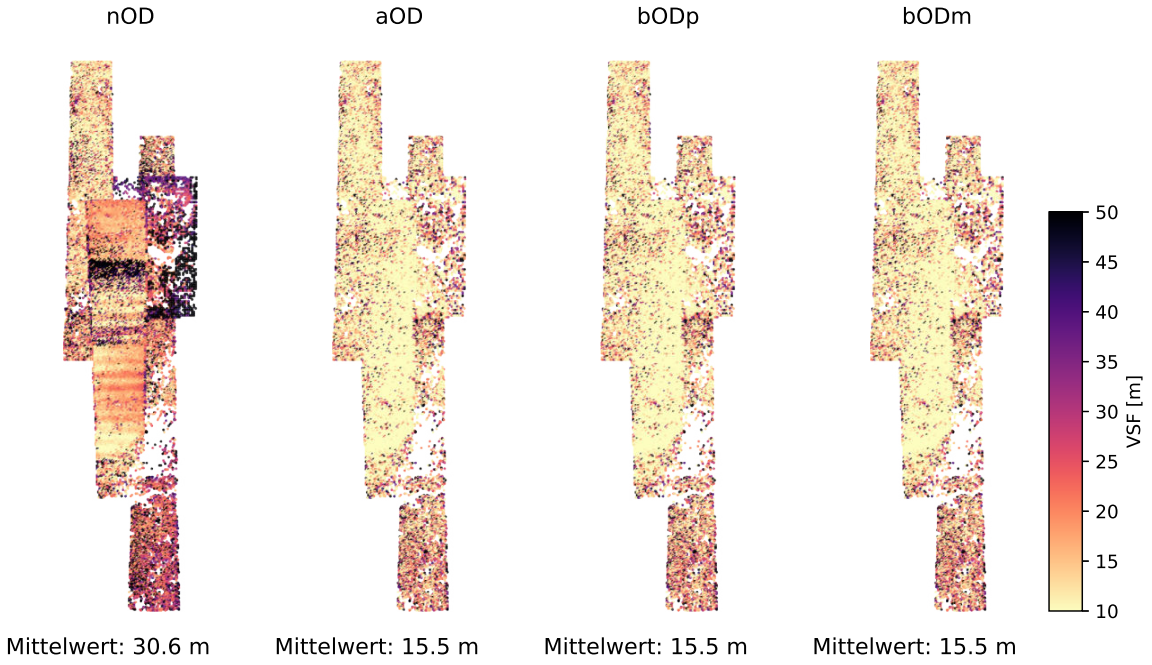


Abbildung 4.25. Vorwärtsschnittfehler (VSF) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit nominellen Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

In der Punktwolke, die mit den nominellen Orientierungsdaten (nOD) generiert wurde, sind deutlich Bereiche mit hohem VSF erkennbar. Der mittig liegende Streifen `ha468_0000` weist die in Abschnitt 4.2.2 betrachteten Schwingungen auf. Der sich rechts oben befindende Streifen `h4350_0001` zeigt über die gesamte Fläche einen deutlich höheren VSF (siehe Tabelle 4.16).

Das arithmetische Mittel des VSF liegt für den gesamten Block, unter Verwendung der nOD, bei 30,6 m und reduziert sich bei Verwendung der aOD deutlich auf 15,5 m. Die Abbildungen und Mittelwerte zu den aOD-, bODp- und bODm-Datensätzen bestätigen, dass die hohe Objektpunktgenauigkeit durch die Blockausgleichung nicht beeinträchtigt wurde.

Um zu evaluieren, wie gut die Anpassung an das MOLA-DGM während der Blockausgleichung erhalten bleiben kann, sind in Abbildung 4.26 die selben Punkte des gesamten Blocks dargestellt. Diesmal sind sie jeweils anhand der Höhendifferenz MDiff zur jeweiligen Rasterzelle des MOLA-DGM eingefärbt.

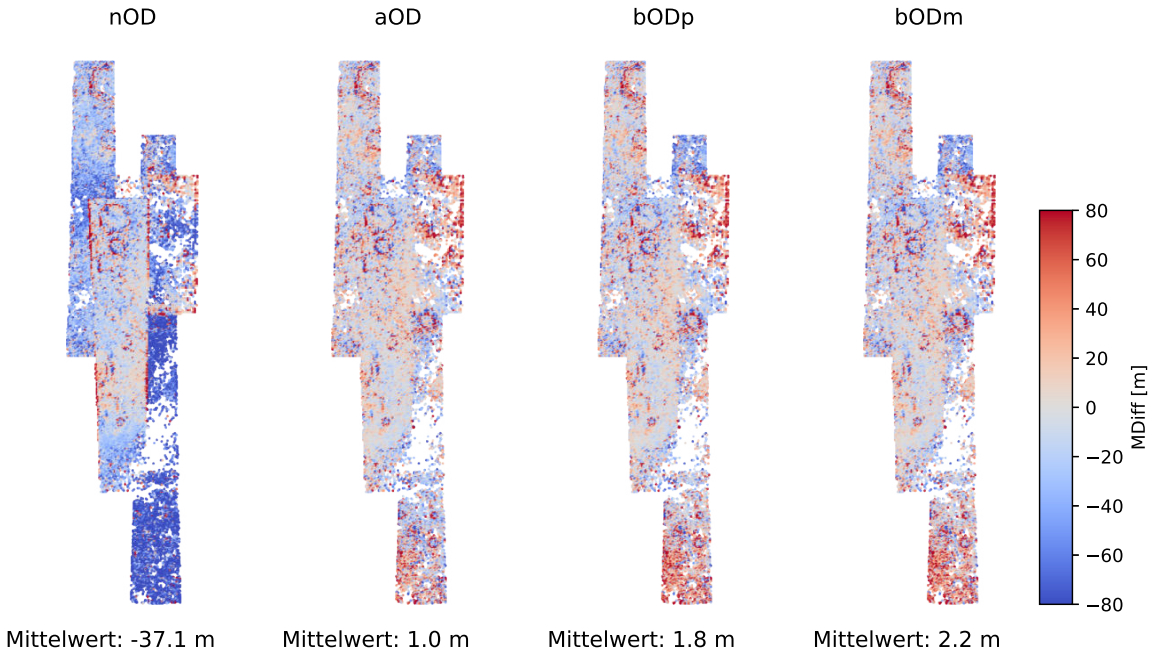


Abbildung 4.26. HRSC-MOLA-Höhendifferenz (MDiff) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit nominellen Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

Mit den nominellen Orientierungsdaten (nOD) sind in der Punktwolke lokale Flächen mit größerer Abweichung erkennbar. Besonders die hohe mittlere Abweichung von -79,9 m von Streifen h1183_0000 (siehe Tabelle 4.16) ist im südöstlichen Bereich des Blocks gut zu erkennen und trägt wesentlich zu den -37,1 m als Mittel für den Block bei. Nach der Ausgleichung als Einzelstreifen ist dieser Mittelwert auf 1,0 m reduziert. Durch die Blockausgleichung erhöhen sich die Mittelwerte jeweils leicht, auf 1,8 m mit den P-Teilblöcken und 2,2 m mit den M-Teilblöcken. Großflächige systematische Abweichungen sind jeweils nicht mehr zu erkennen. Eine mögliche Erklärung für den Anstieg der mMDiff-Werte lautet, dass die bereits erwähnten systematischen Fehler in den Daten sich unterschiedlich stark auswirken, abhängig davon wie viele Verknüpfungspunkte, und damit DGM-Beobachtungen, vorliegen. So sind bei der M-Teilblockvariante, bei der weniger Verknüpfungspunkte verwendet wurden, die Abweichungen auch etwas höher.

Die Passgenauigkeit der Streifen relativ zueinander wird durch die Berechnung von Punktdifferenzen (PDiff) evaluiert. Die dichte Punktwolke, die zur Analyse von VSF und MDiff herangezogen wurde, kann dabei nicht verwendet werden. Sie enthält keine Zwei-Streifen-Punkte. Stattdessen werden die Punkte aus der Verknüpfungspunktbestimmung der P-Teilblöcke verwendet, da in diesen die benötigten Zwei-Streifen-Punkten vorliegen (siehe Abschnitt 3.2.4). Für jeden Orientierungsdatensatz (nOD, aOD, bODp und bODm) wird nun eine eigene Punktwolke für den gesamten Block erstellt. Die vier resultierenden Punktwolken werden jeweils, abhängig vom PDiff, eingefärbt in Abbildung 4.27 dargestellt. Die untere und obere Grenze der Farbskala sind im Vergleich zu den VSF-Abbildungen doppelt so groß gewählt, um den häufig höheren Werten gerecht zu werden.

Es ist dabei zu beachten, dass nicht alle 958 Zwei-Streifen-Punkte (siehe Abbildung 4.24) zur Berechnung eines PDiff-Wertes verwendet werden können: Für den Vorwärtsschnitt werden grundsätzlich nur 3-Strahl-Punkte zur Berechnung der Objektkoordinaten verwendet. Für die Berechnung der PDiff sind also nur die Punkte geeignet, die in beiden Streifen in drei Bildern zugeordnet werden konnten. Für den hier betrachteten Block sind dies 486 Punkte. Deshalb ist die Punktwolke in Abbildung 4.27 entsprechend lückenhaft. Aus den vier Mittelwerten lässt sich ablesen, dass die Einzelstreifenausglei-

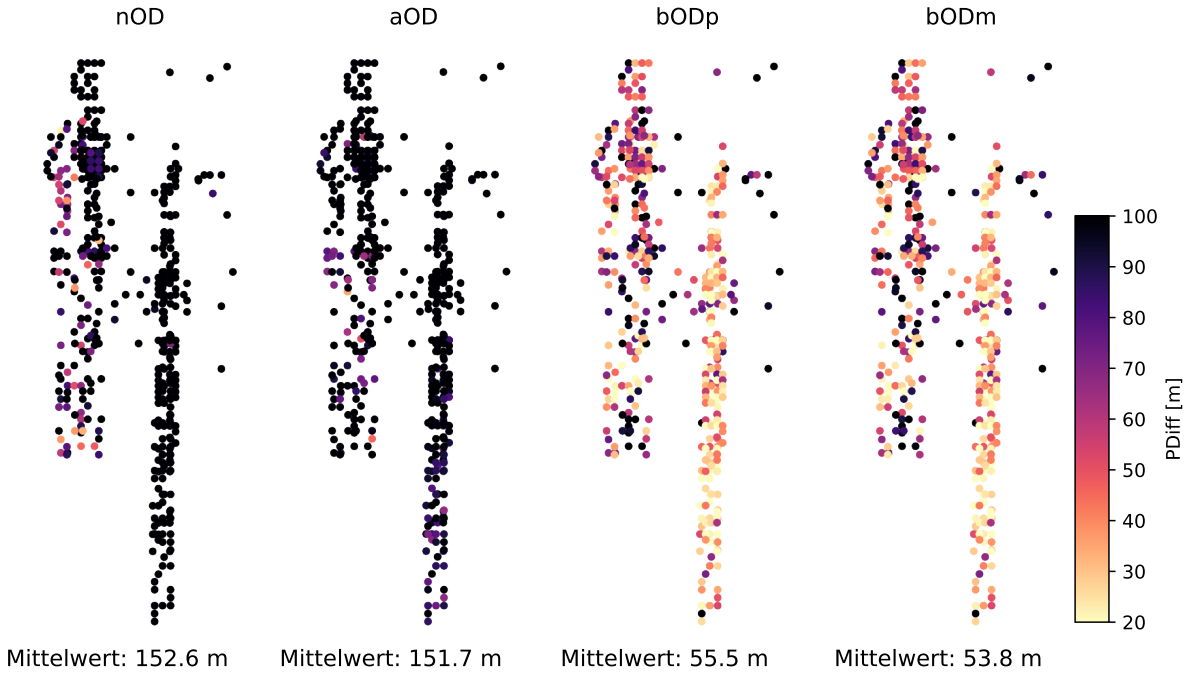


Abbildung 4.27. Differenz zwischen Punkten benachbarter Streifen (PDiff) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit nominellen Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

chung nicht zu einer Verbesserung der PDiff-Werte führt. Die Ausgleichung als Block dagegen führt, sowohl mit P-Teilblöcken als auch mit M-Teilblöcken, zu einer deutlichen Verbesserung: Der mPDiff reduziert sich von rund 150 m auf 50 m.

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertungen der Daten des kleinen Blocks zeigen, dass die gewählte Methodik und die verwendeten Stellgrößen die erwünschten Ergebnisse erzielen: Der mPDiff wird durch die Blockausgleichung deutlich (um den Faktor 3) auf rund 50 m reduziert und erreicht damit eine Größenordnung, die entsprechend der Auflösung zur DGM-Erstellung geeignet ist. Der Unterschied zwischen der Verwendung von P-Teilblöcken und M-Teilblöcken ist dabei nur gering. Gleichzeitig bleibt die hohe Präzision der Orientierungsdaten, gemessen am VSF, erhalten. Dieses wurde erreicht, indem die Orientierungsdaten der Einzelstreifenausgleichung übernommen und die bereits optimierten Lagewinkel durch Anpassung des stochastischen Modells festgehalten wurden. Die Anpassung an das MOLA-DGM verschlechtert sich leicht. Ob das auch bei anderen Blöcken der Fall ist, wird später betrachtet. Als Zusammenfassung der Evaluierung sind in Tabelle 4.16 die Mittelwerte für die drei Qualitätsmaße angegeben.

	nOD	aOD	bODp	bODm
mVSF [m]	30,6	15,5	15,5	15,5
mMDiff [m]	-37,1	1,0	1,8	2,2
mPDiff [m]	152,6	151,7	55,5	53,8

Tabelle 4.16. Zusammenfassung der Evaluierungsergebnisse der Orientierungsdaten: mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF), mittlere HRSC-MOLA-Höhendifferenz (mMDiff) und mittlere Punktdifferenz (mPDiff); für nominelle Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

4.3.2. Untersuchungen zum Verknüpfungspunktfilter

Ziele

Genauso wie der kleine Block im vorigen Abschnitt wurden auch größere Blöcke durch die Blockausgleichung optimiert. Dabei hat sich gezeigt, dass, mit steigender Anzahl der Streifen und Teilblöcke, sehr schnell die benötigten Rechnerressourcen und Laufzeiten steigen (Bostelmann et al., 2017). Aus diesem Grund wurde der in Abschnitt 3.3.4 vorgestellte Verknüpfungspunktfilter entwickelt. Er ist aus praktischer Sicht für die systematische Prozessierung der MC-30-Halbkacheln unverzichtbar. In diesem Abschnitt soll nun aufgezeigt werden, wie sich der Verknüpfungspunktfilter auf die Ergebnisse einer Blockausgleichung auswirkt. Dabei soll der Einfluss der verwendeten Rasterzellengröße (siehe Abschnitt 3.3.4) anhand von Testreihen untersucht werden. Ebenso soll der Einfluss der verwendeten Teilblockvariante betrachtet werden.

Die Blöcke der MC-30-Halbkacheln sind für solche Untersuchungen zu groß: Da sie sich jeweils aus rund 100 Streifen und mehreren hundert Teilblöcken zusammensetzen, könnten Testreihen nur mit sehr großem Zeitaufwand durchgeführt werden. Der im vorigen Abschnitt ausführlich analysierte, kleine Block aus vier Streifen wird dagegen als zu wenig repräsentativ angesehen: Die Ergebnisse seiner Auswertung sind möglicherweise nicht geeignet um allgemeingültige Aussagen zum Verknüpfungspunktfilter zu treffen, die auch auf große Blöcke übertragen werden können. Jedoch ist das hier vorgestellte Verfahren insbesondere für diese großen Blöcke entwickelt worden. Als Kompromiss wird daher ein Block mittlerer Größe verwendet, welcher aus 39 Streifen besteht.

Daten

Die 39 HRSC-Streifen des mittelgroßen Blocks liegen im südöstlichen Teil der Halbkachel MC-11-E. Die vier Streifen des kleinen Blocks sind in diesen 39 Streifen enthalten. Teile der Nadirbilder und die Struktur des Blocks sind in Abbildung 4.28 dargestellt. Es gibt im Block insgesamt 147 paarweise Überlappungen, sodass 294 P-Teilblöcke und 39 M-Teilblöcke gebildet werden können. Für jeden dieser Teilblöcke werden Verknüpfungspunkte bestimmt. Bei einigen der P-Teilblöcke werden nur sehr wenige oder überhaupt keine Verknüpfungspunkte gefunden. Häufig - aber nicht immer - ist, wie in den Beispielen in Abbildung 4.29 zu sehen, ein sehr kleiner Überlappungsbereich die Ursache.

Es hat sich bei Experimenten als sinnvoll erwiesen, für die Blockausgleichung ausschließlich P-Teilblöcke zu verwenden, bei denen mindestens zehn Zwei-Streifen-Punkte bestimmt werden konnten. Außerdem sollte eine Blockausgleichung mit den beiden Streifen jeweils zu einer Verbesserung der Orientierungsdaten geführt haben. Dieses ist bei den P-Teilblöcken in 248 von ursprünglich 294 Fällen gegeben.

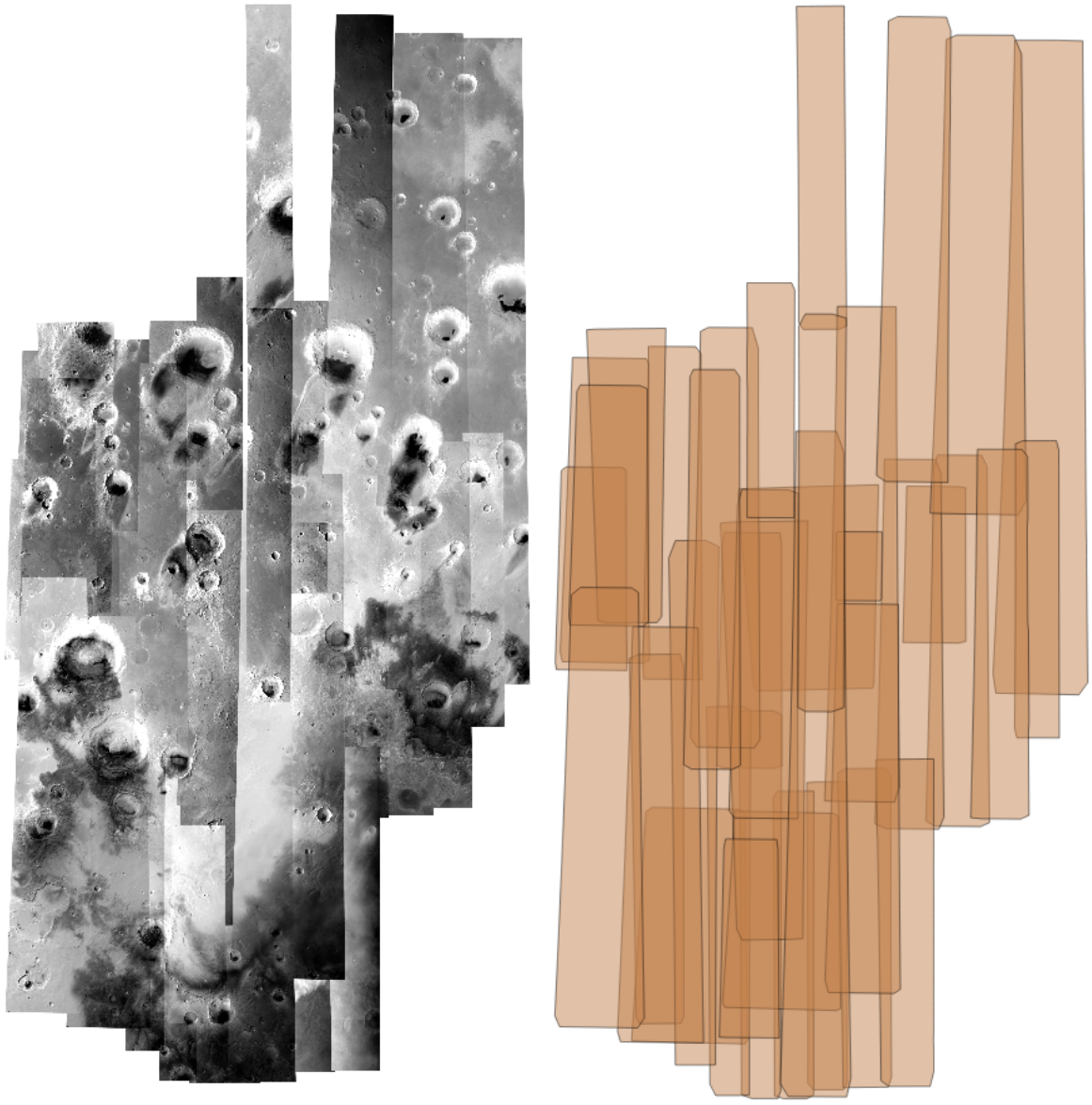


Abbildung 4.28. Mittelgroßer photogrammetrischer Block aus 39 HRSC-Streifen; links: Orthofotos der Nadir-Bilderstreifen; rechts: Footprints

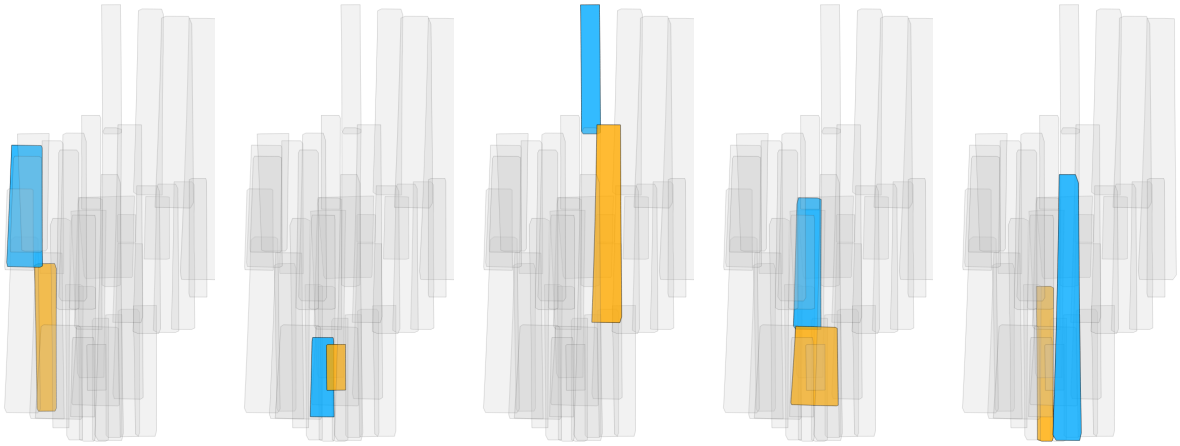


Abbildung 4.29. Beispiele für P-Teilblöcke mit zu wenigen Verknüpfungspunkten aufgrund geringer Überlappung

Bei der M-Teilblockvariante werden, ohne vorige Teilblockausgleichung, alle Teilblöcke verwendet.

Um zwei Referenzdatensätze zu erhalten, wird nun zunächst mit den Verknüpfungspunkten der beiden Teilblockvarianten die Blockausgleichung durchgeführt, ohne vorher den Verknüpfungspunktfilter anzuwenden. Die resultierenden Orientierungsdatensätze, bODp und bODm, zeigen bei der Evaluierung ähnliche Ergebnisse wie beim kleinen Block: Der VSF, der durch die Einzelstreifenausgleichung von 32,7 m auf 14,6 m reduziert wurde, wird durch die Blockausgleichung nicht beeinträchtigt und bleibt bei diesem Wert (siehe Abbildung 4.30)

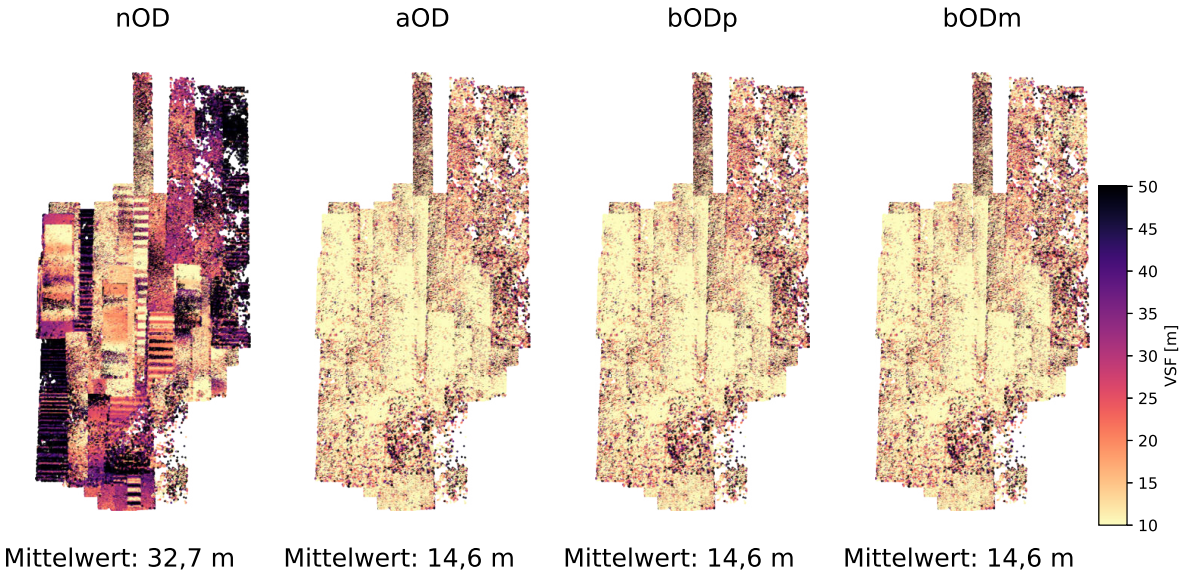


Abbildung 4.30. Vorwärtsschnittfehler (VSF) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit nominellen Orientierungsdaten (nOD), die Orientierungsdaten nach der Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach der Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

Die Abweichung vom MOLA-DGM, gemessen als mMDiff, welche durch die Einzelstreifenausgleichung von -26,3 m auf 1,3 m reduziert wurde, erhöht sich durch die Blockausgleichung leicht auf 2,3 m bzw. 3,0 m (siehe Abbildung 4.31).

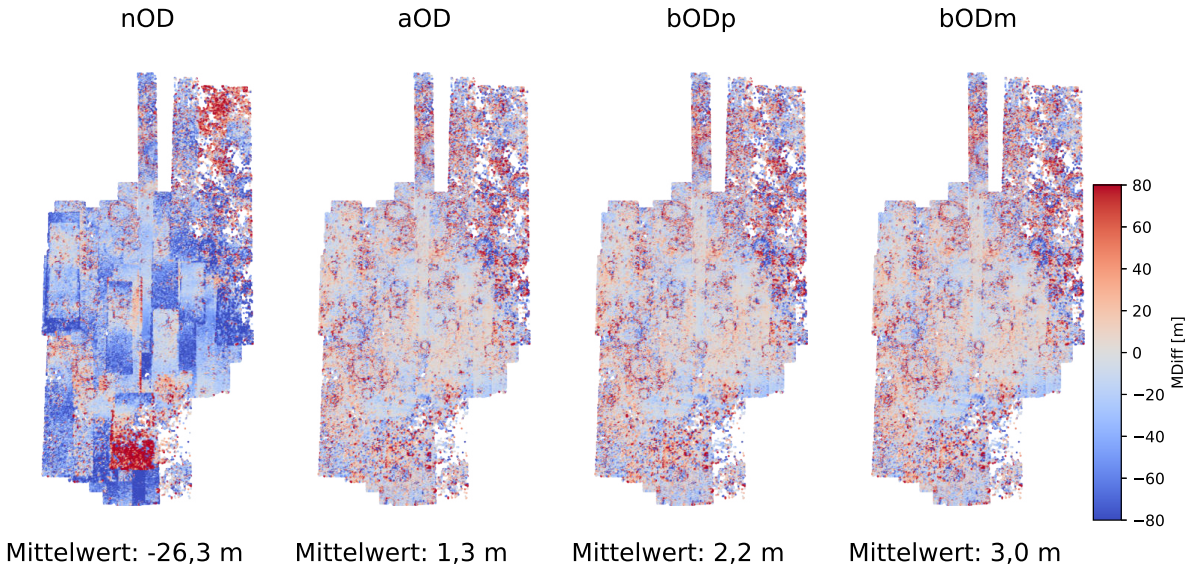


Abbildung 4.31. HRSC-MOLA-Höhendifferenz (MDiff) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit nominellen Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

Anders als beim kleinen Block, reduzieren sich die Punktdifferenzen zwischen den Streifen in diesem Block bereits durch die Einzelstreifenausgleichung deutlich. Die mittlere Differenz mPDiff fällt von 112,3 m auf 78,9 m. In Abbildung 4.32 sind allerdings für die aOD noch großflächig Bereiche zu erkennen, in denen die Punkte einen PDiff von 100 m und mehr aufweisen. Diese Bereiche sind in den PDiff-Abbildungen für die blockausgeglichenen Orientierungsdaten bODp und bODm nicht mehr vorhanden. Der Mittelwert ist noch einmal deutlich auf 36,3 m bzw. 36,5 m reduziert worden. Im Vergleich zum kleinen Block ist der Unterschied zwischen der P-Teilblock- und der M-Teilblockvariante etwas geringer und fällt diesmal zugunsten der P-Teilblöcke aus. Tabelle 4.17 fasst die Evaluierungsergebnisse der Orientierungsdaten des Blocks zusammen. Diese Werte werden für die Untersuchungen zum Einfluss des Verknüpfungspunktfilters auf die Ergebnisse der Blockausgleichung im nächsten Abschnitt als Referenz verwendet.

	nOD	**aOD**	**bODp**	**bODm**
mVSF [m]	32,7	14,6	14,6	14,6
mMDiff [m]	-26,3	1,3	2,2	3,0
mPDiff [m]	112,3	78,9	36,3	36,5

Tabelle 4.17. Zusammenfassung der Evaluierungsergebnisse der Orientierungsdaten: mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF), mittlere HRSC-MOLA-Höhendifferenz (mMDiff) und mittlere Punktdifferenz (mPDiff); für nominelle Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

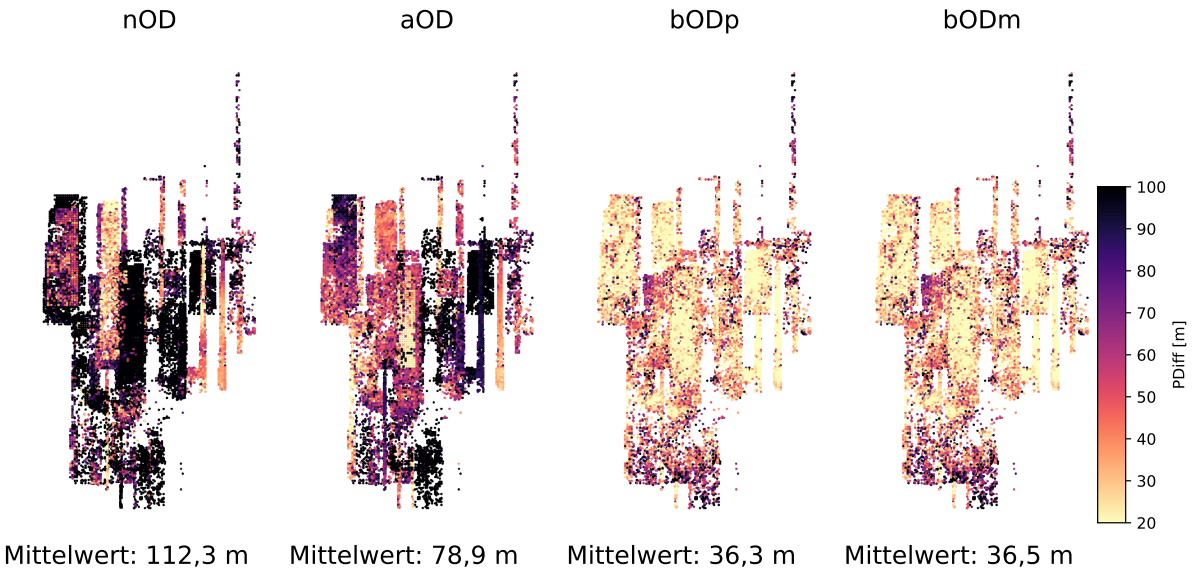


Abbildung 4.32. Differenz zwischen Punkten benachbarter Streifen (PDiff) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit nominellen Orientierungsdaten (nOD), die Orientierungsdaten nach der Einzelstreifenausgleichung (aOD), nach der Blockausgleichung mit P-Teilblöcken (bODp) und mit M-Teilblöcken (bODm)

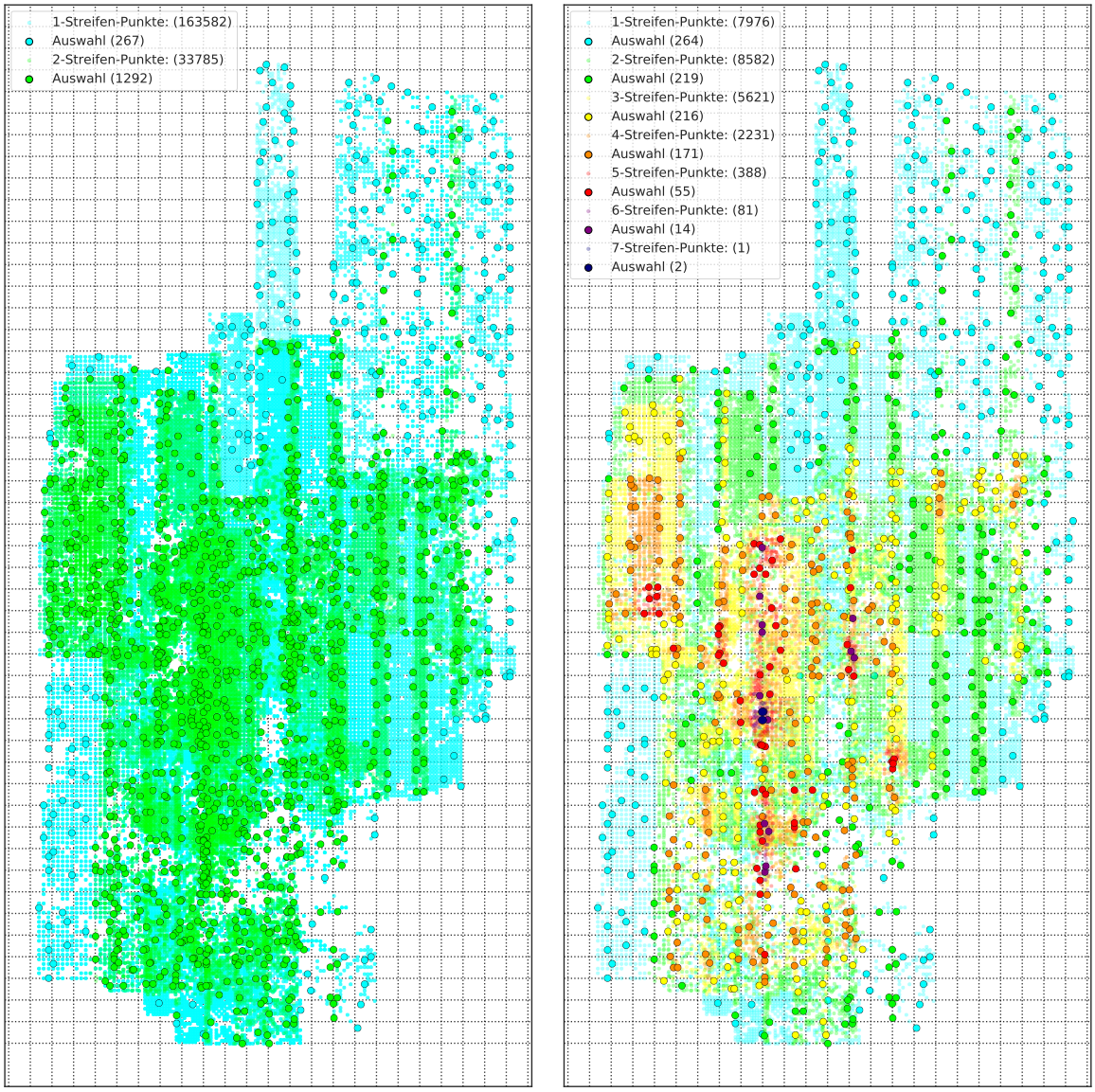
Einfluss des Verknüpfungspunktfilters auf die Bündelausgleichung

In Abbildung 4.33 sind alle Verknüpfungspunkte des Blocks dargestellt: In der P-Teilblockvariante sind es 198 926 und in der M-Teilblockvariante 25 821. Die Farbe der Punkte gibt an, in wie vielen Streifen der jeweilige Punkt zugeordnet werden konnte. Bei der M-Teilblockvariante können z.B. die dunkelblauen Punkte in bis zu 35 Bildern zugeordnet worden sein, vorausgesetzt, jeder der sieben Streifen verfügt über alle fünf Bilder der panchromatischen Kanäle. Das ebenfalls dargestellte Raster hat eine Zellengröße von 80 Pixeln. Die Pixel beziehen sich dabei auf das MOLA-DGM im MEGDR-Format mit einer Auflösung von 463 m am Äquator. Mit diesem Raster reduziert sich durch den Verknüpfungspunktfilter die Anzahl der Punkte sehr deutlich: für die P-Teilblöcke auf 1 559 Punkte und für die M-Teilblöcke auf 941. Diese ausgewählten Punkte sind jeweils hervorgehoben.

Zusätzlich zu der Variante mit 80 Pixeln Rasterzellengröße, wird der Filter auch mit den Größen 10, 20, 30, 40, 50, 60 und 70 Pixeln auf beide Datensätze angewendet. Somit liegen 16 unterschiedliche Sätze an Verknüpfungspunkten vor, für die jeweils die Blockausgleichung und Evaluierung durchgeführt wird. In Abbildung 4.34 ist für beide Varianten der Teilblöcke der Einfluss der Rasterzellengröße auf die Anzahl der Verknüpfungspunkte dargestellt.

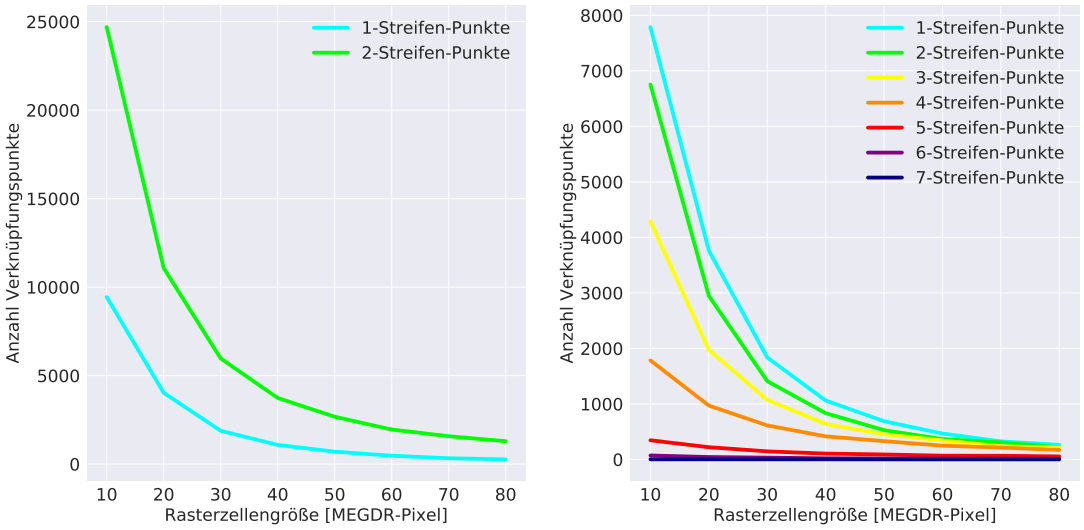
Je größer die Rasterzellen werden, desto weniger Gruppen werden für die Auswahl der Punkte gebildet (siehe Abschnitt 3.3.4). Entsprechend reduziert sich auch die Gesamtzahl der ausgewählten Punkte. Daraus ergibt sich bei der Bündelausgleichung die erwünschte Reduktion der benötigten Laufzeit (siehe Abbildung 4.35).

Für die Variante der P-Teilblöcke beträgt die Laufzeit mit 10 Pixeln Rasterzellengröße beispielsweise rund 1 h 20 min. Mit 80 Pixeln beträgt sie nur noch 8 min 30 s. Werden die Punkte ungefiltert für die Ausgleichung verwendet, beträgt die Laufzeit 10 h 55 min. Kommen die Punkte der M-Teilblöcke zur Anwendung, reduziert sich die Laufzeit mit zunehmender Rasterzellengröße ebenfalls sehr deutlich.



P-Teilblöcke M-Teilblöcke

Abbildung 4.33. Durch den Verknüpfungspunktfilter ausgewählte Verknüpfungspunkte: Ein-Streifen-Punkte (türkis) sowie Zwei-Streifen-Punkte (grün) bei den P-Teilblöcken; Ein- bis Sieben-Streifen-Punkte bei den M-Teilblöcken



P-Teilblöcke M-Teilblöcke

Abbildung 4.34. Einfluss der Rasterweite des Verknüpfungspunktfilters auf Anzahl der Verknüpfungspunkte; links: Punkte der P-Teilblöcke; rechts: Punkte M-Teilblöcke

Im Vergleich zu den ungefilterten Punkten, mit denen die Bündelausgleichung 49 min 42 s benötigt, ist die Reduktion aber geringer. Letzteres kann damit erklärt werden, dass mit der Variante der P-Teilblöcke, durch die paarweise Verknüpfung sehr viele redundante Verknüpfungspunkte vorlagen, was bei den M-Teilblöcken nicht der Fall ist.

Entscheidend für die Beurteilung des Verknüpfungspunktfilters ist, neben dem Einfluss auf die Laufzeit der Ausgleichung, vor allem die Frage, wie sich die reduzierte Anzahl der Verknüpfungspunkte auf die Qualität der resultierenden Orientierungsdaten auswirkt. Aus diesem Grund wurden die resultierenden 16 Datensätze evaluiert und dabei jeweils der mPDiff als Maß für die gegenseitige Passgenauigkeit der Streifen berechnet. Wie in Abbildung 4.35 zu sehen ist, steigt dieser ab einer Rasterzellengröße von 10-20 Pixeln leicht an, bleibt aber, selbst mit den größten Rasterzellen, deutlich unter den Werten für die nOD und aOD.

Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Blockausgleichungsergebnisse von 16 Versionen des mittelgroßen Blocks aus 39 HRSC-Streifen hat folgende Erkenntnisse geliefert:

- Auch wenn sich die Anzahl der Verknüpfungspunkte durch den Filter deutlich reduziert, werden damit die Orientierungsdaten der HRSC-Bilder durch die Bündelausgleichung deutlich verbessert.
- Wird die Rasterzellengröße ausreichend klein gewählt (< 20 Pixel), ist in den Ergebnissen der Ausgleichung mit gefilterten und ungefilterten Verknüpfungspunkten kein Unterschied in der Qualität festzustellen.
- Für beide Teilblockvarianten führt die Filterung der Verknüpfungspunkte zu einer deutlichen Reduktion der Laufzeiten für die Bündelausgleichung.
- Die Variante der M-Teilblöcke liefert etwas bessere Ergebnisse, da mit weniger Punkten in kürzerer Zeit die gleichen mPDiff-Werte erreicht werden können.

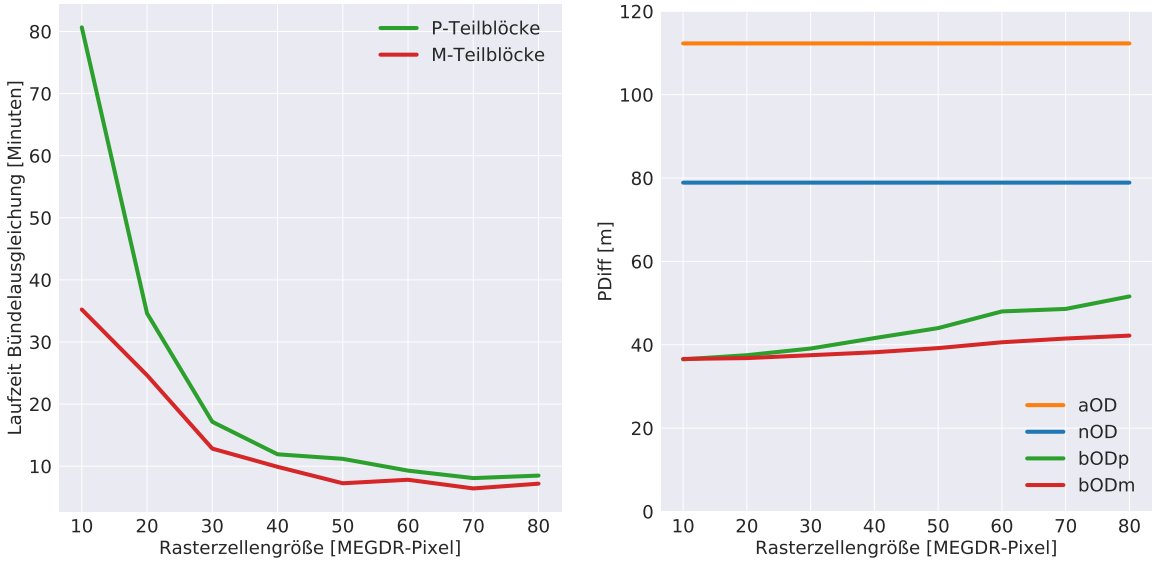


Abbildung 4.35. Einfluss der Rasterweite des Verknüpfungspunktfilters auf die Laufzeit (links) und das Ergebnis der Blockausgleichung (rechts)

Für die systematische Bündelausgleichung der MC-30-Halbkacheln werden aus diesen Erkenntnissen folgende Schlüsse gezogen:

1. Die Wahl einer Rasterzellengröße von 40 Pixeln ist ein guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand der Blockausgleichung und Qualität der Ergebnisse. Die Ausdünnung der Verknüpfungspunkte führt mit dieser Rasterzellengröße zu einer deutlichen Reduktion der Laufzeit. Eine stärkere Ausdünnung der Punkte brächte nur wenig zusätzliche Zeitersparnis. Gleichzeitig sind die PDiff-Werte bei 40 Pixeln Rasterzellengröße im Vergleich zu den ungefilterten Verknüpfungspunkten nur leicht angestiegen.

2. Zwar konnten die theoretischen Überlegungen, dass M-Teilblöcke etwas besser sind, bestätigt werden, jedoch überwiegen aus praktischer Sicht die Vorteile der P-Teilblöcke (Wiederverwendbarkeit der Teilblöcke, einheitliche Größe, Stabilität bei schwierigen Daten, siehe Abschnitt 3.3.3). Aus diesem Grund werden für die systematische Verarbeitung großer Blöcke ausschließlich P-Teilblöcke verwendet.

4.3.3. Systematische Bündelausgleichung der MC-30-Blöcke

Eine Zielsetzung dieser Arbeit ist, dass die entwickelten Methoden sich zur systematischen Verarbeitung aller HRSC-Daten eignen. Durch die im Folgenden dargestellten Experimente soll dieses nun auch für große Blöcke überprüft werden. Zunächst wird ein Block der Halbkachel MC-11-E betrachtet. Anschließend wird dieser zusammen mit 31 weiteren Blöcken derselben Größe ausgewertet.

Block MC-11-E

Der Block MC-11-E setzt sich aus 115 Streifen zusammen (siehe Abbildung 4.36). Dabei sind alle HRSC-Datensätze berücksichtigt, die am 30. Oktober 2018 vorlagen (siehe Abschnitt 4.1.2). Es gibt 547 paarweise Überlappungen, sodass sich 1094 mögliche P-Teilblöcke daraus ergeben.

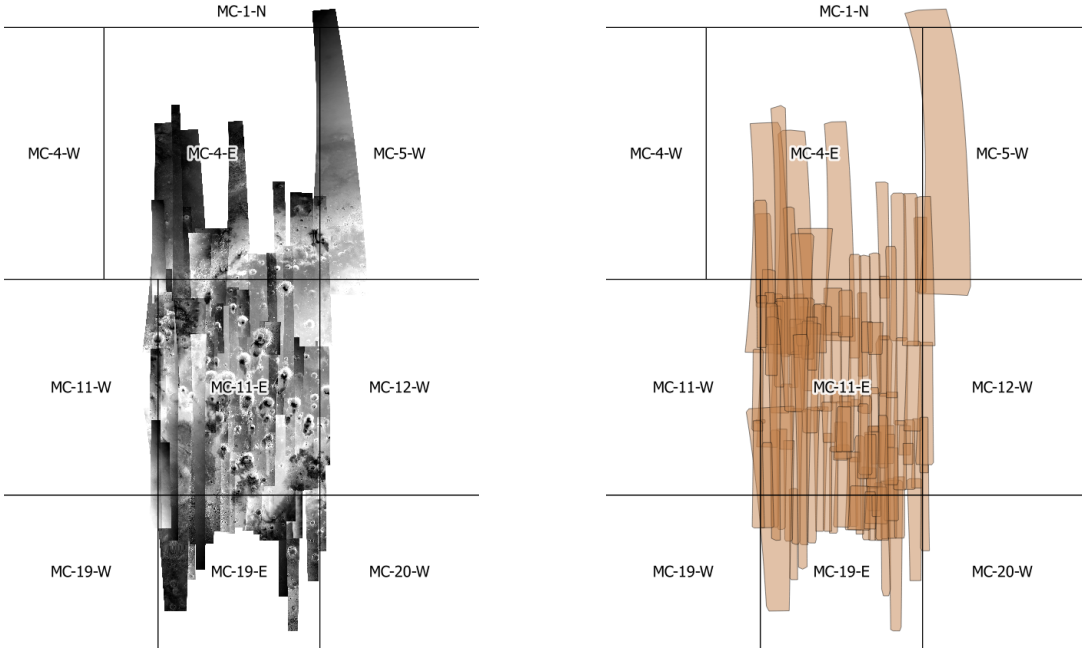


Abbildung 4.36. Großer photogrammetrischer Block aus 115 HRSC-Streifen im Gebiet der Halbkachel MC-11-E; links: Orthofotos der Nadir-Bildstreifen; rechts: Footprints

Um die Heterogenität der Streifen des Blocks beurteilen zu können, werden im Folgenden, neben Länge und Auflösung der jeweiligen Streifen, auch der mVSFa und die mMDiffa betrachtet.

In Abbildung 4.37 ist für alle 115 Streifen die geometrische Auflösung (*Best Ground Sampling Distance*) des Nadirbildes dargestellt.

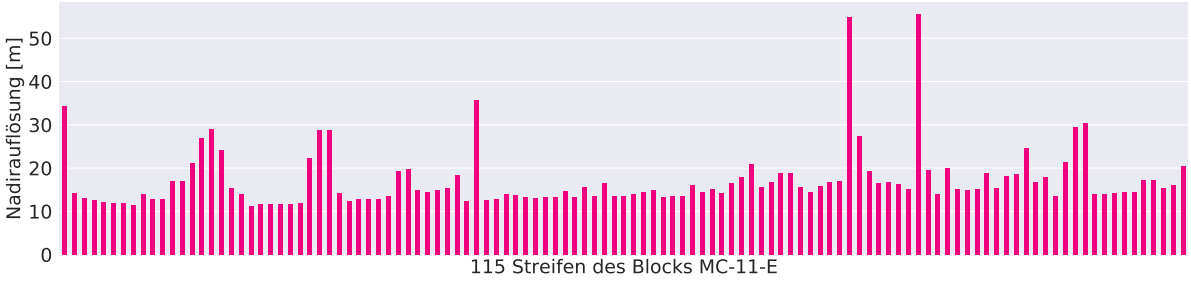


Abbildung 4.37. Auflösung für alle 115 Streifen des Blocks MC-11-E; (entspricht jeweils der kleinsten Objektpixelgröße im Nadirbild)

Der Median liegt bei 15,1 m. Bei zwei Streifen wurden die Nadirbilder im MPF4 gespeichert, weshalb dort die Nadirauflösung über 50 m liegt. Der bereits aus dem kleinen Block bekannte Streifen `h4350_0001` und einige weitere Streifen haben aufgrund einer größeren Aufnahmehöhe eine geringere Auflösung. Der Großteil der Streifen liegt im Bereich von 10 - 20 m Objektpixelgröße.

Bei der Länge der Bildstreifen, gemessen an der Anzahl der Bildzeilen im Nadirbild, ist für die 115 Streifen eine größere Variation zu erkennen (siehe Abbildung 4.38).

Der Median liegt für diesen Datensatz bei 41 032 Bildzeilen. Beim längsten Streifen `h1326_0000` besteht das Nadirbild aus 182 888 Bildzeilen. `h3026_0000` ist mit 2 248 Bildzeilen der kürzeste Streifen.

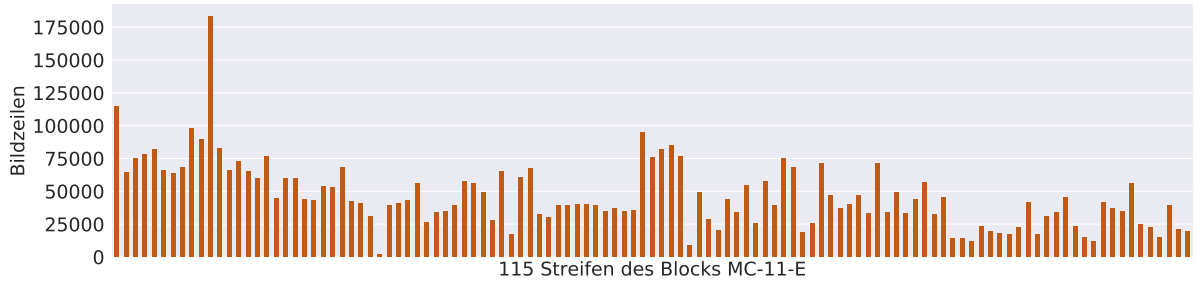


Abbildung 4.38. Anzahl der Bildzeilen für alle 115 Streifen des Blocks MC-11-E

Die chronologisch geordneten Streifen (links: die ältesten, rechts die jüngsten), lassen einen deutlichen Trend zu kürzeren Streifen erkennen. Zu Beginn der HRSC-Mission wurden insgesamt deutlich mehr lange Streifen aufgenommen, was sich auch hier an den ausgewählten 115 Streifen zeigt.

In Abbildung 4.39 ist der mittlere Vorwärtsschnittfehler nach der Einzelstreifenausgleichung (mVSFa) jeweils pro Streifen dargestellt. Der Median liegt bei 15,6 m.

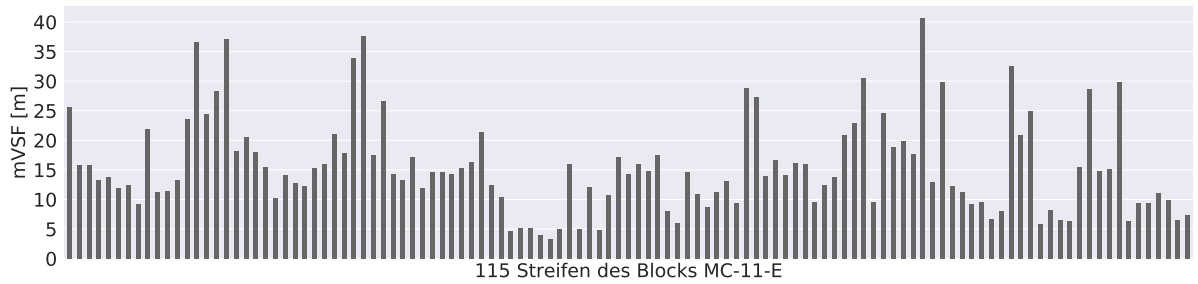


Abbildung 4.39. Mittlerer Vorwärtsschnittfehler nach der Einzelstreifenausgleichung (mVSFa) für alle 115 Streifen des Blocks MC-11-E

Die mittlere Abweichung vom MOLA-DGM weist bis auf vier Ausnahmen positive Differenzen auf (siehe Abbildung 4.40). Die drei größten Abweichungen sind durch Sandstürme oder Wolken zu erklären.

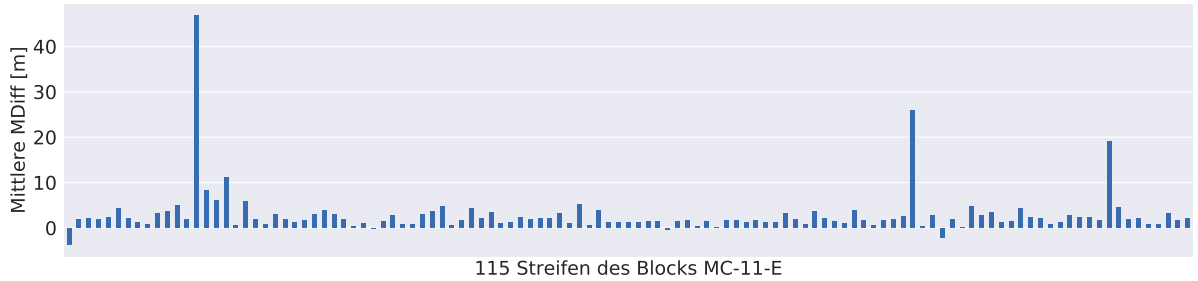
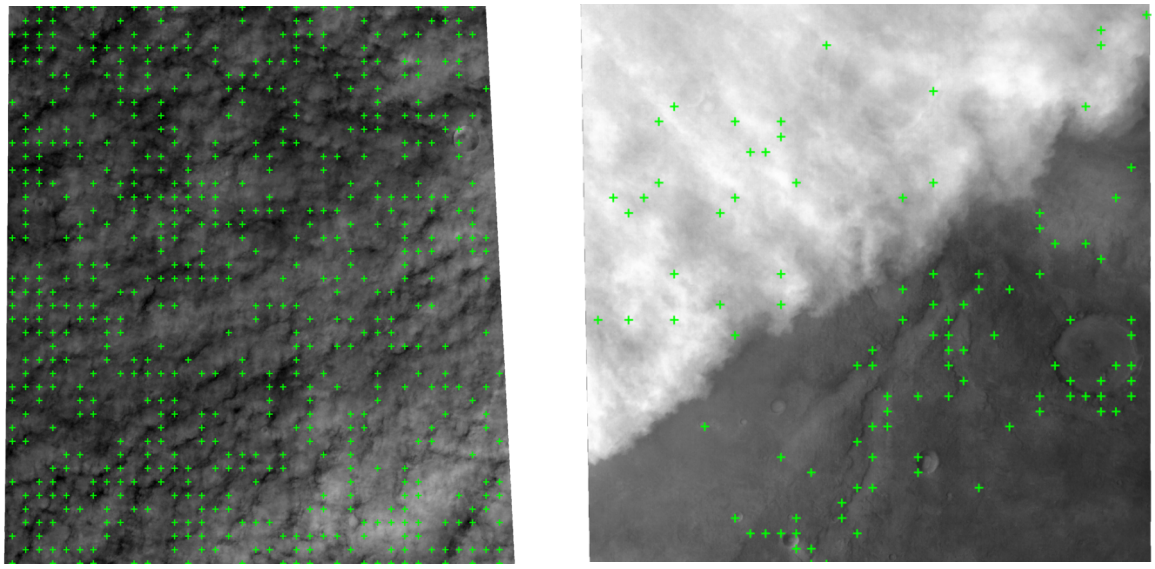


Abbildung 4.40. Mittlere HRSC-MOLA-Differenz nach der Einzelstreifenausgleichung (mMDiffa) für alle 115 Streifen des Blocks MC-11-E

Bei einem großen Teil der Punkte, die für die Evaluierung verwendet werden, handelt es sich nicht um Geländepunkte, sondern um Punkte auf Wolken (siehe Abbildung 4.41). Diese befinden sich deutlich oberhalb der tatsächlichen Geländeoberfläche und weisen daher eine entsprechende Abweichung vom MOLA-DGM auf.

Um in den 1 094 P-Teilblöcken von MC-11-E die Verknüpfungspunkte zu bestimmen, wird ebenfalls eine Gitterweite von 200 Pixeln im Master-Bild verwendet. Anhand der Evaluierung der jeweiligen Teilblockausgleichungsergebnisse werden die Verknüpfungspunkte von 892 der 1 094 Teilblöcke als geeignet eingestuft und ihre Verknüpfungspunkte für die Blockausgleichung vorgesehen. Insgesamt sind dies 1 019 858 Punkte. Für drei Streifen finden sich in den Daten der Teilblöcke keine geeigneten Verknüpfungspunkte, sodass es nicht möglich ist, diese Streifen in der Blockausgleichung zu berücksichtigen und sich die Anzahl der Streifen von 115 auf 112 reduziert. Die Anwendung des Verknüpfungspunktfilters auf die erfolgreich zugeordneten Punkte mit einer Rasterzellengröße von 40 Pixeln dünnt die Punkte deutlich aus. Für den gesamten Block verbleiben noch 26 394 Verknüpfungspunkte. Mit diesen Punkten dauert die gesamte Blockausgleichung insgesamt 3 h 52 min.



Bildausschnitt: `h1498_0000` Bildausschnitt: `hg662_0000`

Abbildung 4.41. Verknüpfungspunkte oberhalb von Wolken

Zur Evaluierung werden, wie bereits bei den vorigen Blöcken, die unterschiedlichen Orientierungsdatensätze nOD, aOD und bOD verglichen, indem jeweils die Mittelwerte berechnet und entsprechende Abbildungen für VSF, MDiff und PDiff erstellt werden. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Auswertungen werden jedoch nicht alle Punkte berücksichtigt, sondern lediglich Punkte, die sich innerhalb der Grenzen der MC-30-Halbkachel befinden. Dadurch wird verhindert, dass die Evaluierung durch Gebiete am Rand des Blocks zu sehr beeinflusst wird. Die Gebiete werden zwar von den Streifen des Blocks überdeckt, sind jedoch für die Erzeugung der Mosaike irrelevant.

Wie groß der ausgeblendete Bereich dabei ist, lässt sich in Abbildung 4.42 erkennen. Dort sind die Punkte, welche zur Evaluierung verwendet werden, entsprechende ihrer Höhe eingefärbt, um zusätzlich einen Eindruck der Topographie des Gebietes zu vermitteln. Es wird dabei deutlich, wie das Gelände in MC-11-E von Südosten nach Nordwesten abfällt und von zahlreichen großen Kratern und einigen Ausflusstälern durchsetzt ist. Bereiche in denen Lücken zwischen den Punkten zu erkennen sind, deuten darauf hin, dass dort nicht genug Streifen mit ausreichender Bildinformation vorhanden sind. Die Information über diese Lücken kann genutzt werden, um entweder neue Aufnahmen zu planen oder bei der Auswertung der Streifen durch individuelle Anpassung der Stellgrößen zu versuchen, mit den verfügbaren Daten eine höhere Punktdichte zu erreichen. Da MC-11-E, eine Halbkachel mit sehr guter Abdeckung ist, sind im Vergleich zu anderen Halbkacheln nur wenige Lücken vorhanden.

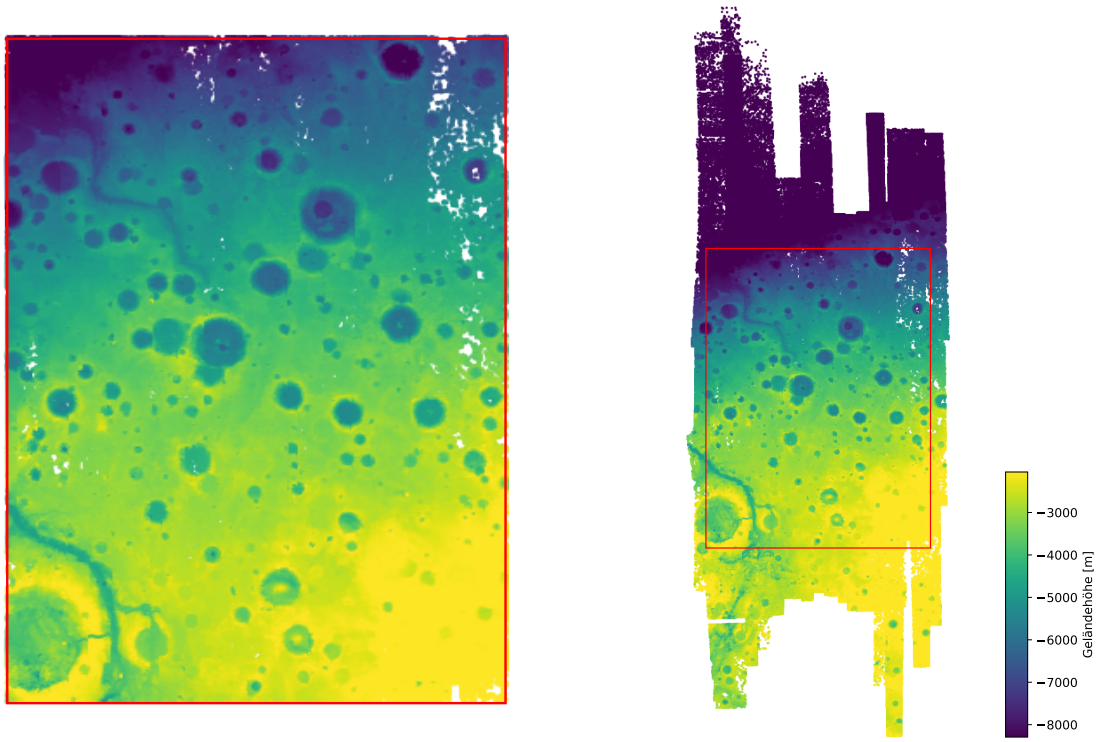


Abbildung 4.42. Objektpunkte zur Evaluierung innerhalb der Halbkachel MC-11-E (links); Gesamtes Gebiet, das von den Streifen des Blocks MC-11-E abgedeckt wird (rechts)

Zunächst wird nun auch hier betrachtet, ob sich der VSF und die MDiff durch die Blockausgleichung verändern bzw. wie sie sich durch die Einzelstreifenausgleichung verbessert haben (siehe Abbildung 4.43 und 4.44). Ob die Blockausgleichung, wie es zu erwarten ist, die gegenseitige Passgenauigkeit der Streifen verbessert, ist auch bei einem Block dieser Größe gut an den Punktdifferenzen in Abbildung 4.45 zu erkennen.

Die Evaluierung der Orientierungsdaten zeigt, dass, mit dem vorgestellten Ansatz und den dabei verwendeten Strategien und gewählten Stellgrößen, auch für diesen großen Block sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die hohe Präzision und die Passgenauigkeit zum MOLA-DGM, die durch die Einzelstreifenausgleichung für die HRSC-Daten erzielt wurden, bleiben erhalten. Zusätzlich wird durch die Blockausgleichung eine deutliche Reduktion der gemittelten Differenzen zwischen benachbarten Streifen erreicht (siehe Tabelle 4.18).
Die Abbildungen der Punkte decken außerdem auf, dass die Bündelausgleichung die Streifen des Blocks auch dahingehend optimiert hat, dass nun ein sehr homogen verteiltes, hohes Genauigkeitsniveau vorliegt. Die zuvor auftretenden, lokalen Unterschiede konnten fast vollständig beseitigt werden.

Es ist anzunehmen, dass sich die Ergebnisse, die für MC-11-E erzielt wurden, nicht unmittelbar auf andere Halbkacheln übertragen lassen: Zum einen, weil oftmals deutlich mehr Lücken in der Abdeckung vorliegen, zum anderen, weil die Topographie und Oberfläche der Halbkacheln teils erheblich variiert. Aus diesen Grund sollen im nächsten Abschnitt weitere Blöcke mit dem selben Ansatz verarbeitet werden.

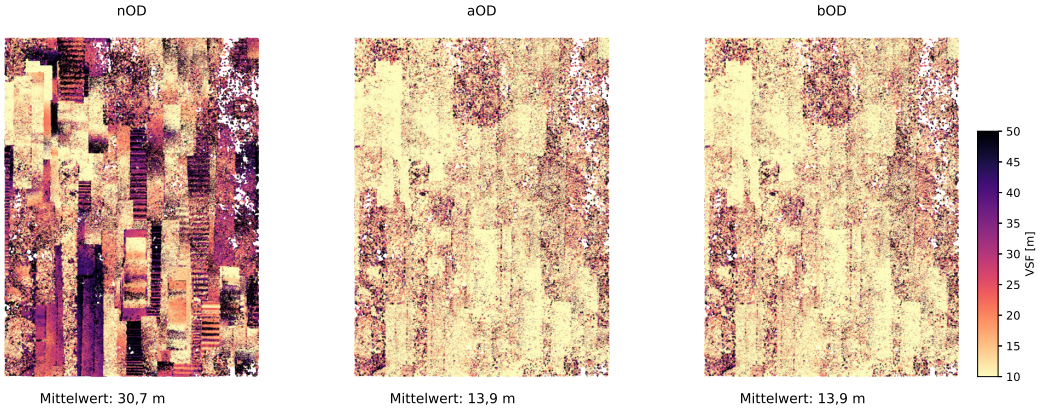


Abbildung 4.43. Vorwärtsschnittfehler (VSF) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit unterschiedlichen Orientierungsdaten (nOD, aOD und bOD)

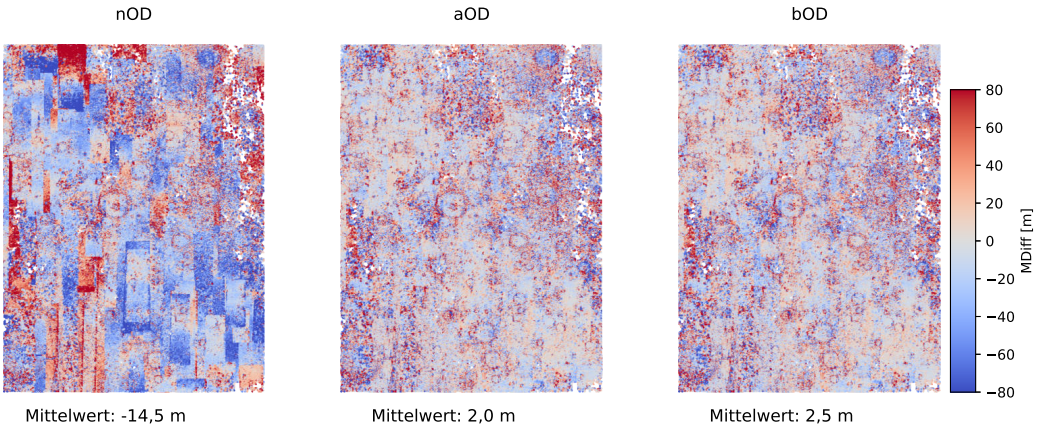


Abbildung 4.44. HRSC-MOLA-Höhendifferenz (MDiff) Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit unterschiedlichen Orientierungsdaten (nOD, aOD und bOD)

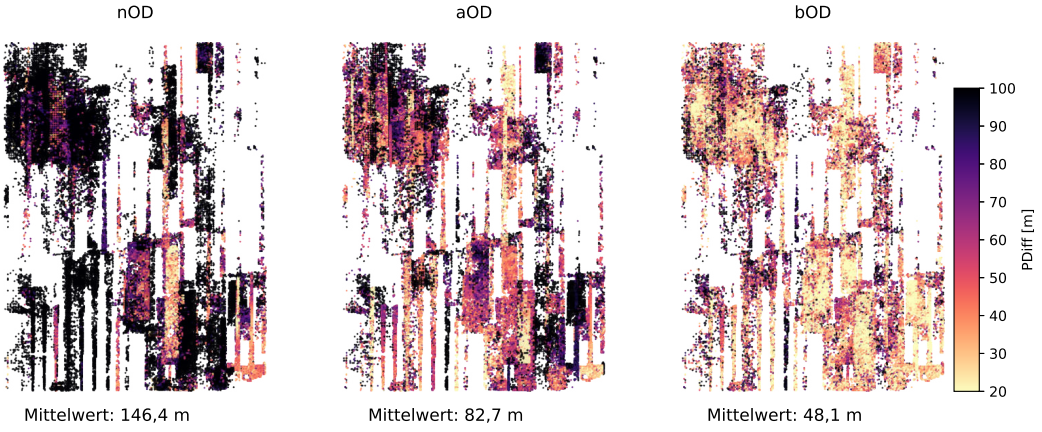


Abbildung 4.45. Distanz zwischen Punkten benachbarter Streifen (PDiff) aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit unterschiedlichen Orientierungsdaten (nOD, aOD und bOD)

	nOD	aOD	bOD
mVSF [m]	30,7	13,9	13,9
mMDiff [m]	-14,5	2,0	2,5
mPDiff [m]	146,4	82,7	48,0

Tabelle 4.18. Zusammenfassung der Evaluierungsergebnisse der Orientierungsdaten: mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF), mittlere HRSC-MOLA-Höhendifferenz (mMDiff) und mittlere Punktdifferenz (mPDiff); für nominelle Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD) und nach Blockausgleichung (bOD)

Weitere Blöcke

Die systematische Bündelausgleichung weiterer Blöcke und die Evaluierung der dabei erzeugten Orientierungsdaten sollen folgende Fragen beantworten:

1. Ist die gewählte Strategie, einschließlich Methoden und gewählten Stellgrößen, die für die Halbkachel MC-11-E entwickelt wurde (Gwinner et al., 2015), auch auf Blöcke mit anderen Daten übertragbar?
2. Sind die erzielten Ergebnisse für MC-11-E repräsentativ und lassen sich die Erkenntnisse der Evaluierung auf andere Blöcke übertragen?
3. Welchen Einfluss hat die Topographie der Oberfläche innerhalb der jeweiligen Halbkachel auf die Ergebnisse der Blockausgleichung?

Um diese Fragen zu beantworten, werden, ebenso wie für MC-11-E, für jeden Block die drei Qualitätsmaße mVSF, mMDiff und mPDiff jeweils für die drei Orientierungsdatensätze nOD, aOD, und bOD verglichen. Aus praktischen Gründen werden für die Bestimmung der Verknüpfungspunkte P-Teilblöcke verwendet.

Die Stellgrößen (Gitterweite der Verknüpfungspunkte, Rasterzellengröße beim Filtern, Gewichtung der Beobachtungen der Ausgleichung) sowie die Kriterien bei der Auswahl der Teilblöcke werden übernommen und für alle Blöcke einheitlich beibehalten.

Abbildung 4.46 gibt einen Überblick über die 32 MC-30-Halbkacheln, welche sich oberhalb und unterhalb des Äquators befinden. Das farbcodierte MOLA-DGM im Hintergrund dient hier zur groben Orientierung. Trotz seiner geringen Auflösung sind einige der markanten Geländestrukturen deutlich zu erkennen: Links und rechts jeweils größere Vulkane; etwas links von der Mitte die Valles Marineris.

Prinzipiell würde die Blockausgleichung auch für die in Abbildung 4.46 nur angeschnittenen Halbkacheln weiter nördlich und südlich funktionieren. Für die Polkacheln sind voraussichtlich Anpassungen an einzelnen Teilen der Prozesskette notwendig. Der Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Halbkacheln am Äquator beschränkt, da diese aktuell im Fokus des HRSC-Teams stehen und dieses der favorisierte Bereich für aktuelle und zukünftige Landemissionen ist.

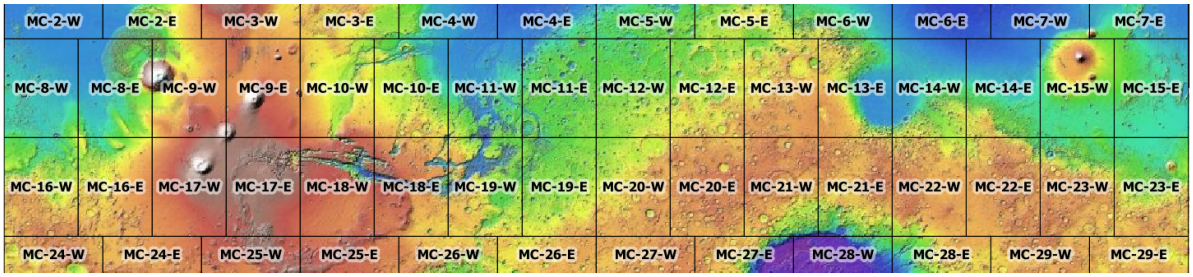


Abbildung 4.46. MC-30-Halbkacheln; Hintergrund: farbcodiertes MEGDR (Quelle: USGS, 2019)

Insgesamt umfasst der Bereich 2 294 Streifen. Mit den vorliegenden Orientierungsdaten aus der Einzelstreifenausgleichung dieser Streifen, werden nun P-Teilblöcke gebildet, um die für die Blockausgleichung notwendigen Verknüpfungspunkte zu bestimmen. Insgesamt ergeben sich 19 164 Teilblöcke. Diese große Anzahl an Streifen und Teilblöcken ist unter anderem der Grund dafür, dass bei einigen der gewählten Stellgrößen ein Kompromiss, zwischen der Qualität der Ergebnisse auf der einen Seite und praktischen Aspekten auf der anderen, gefunden werden musste.

Im Mittel beträgt die Anzahl der Teilblöcke pro Halbkachel 674. Einige dieser Teilblöcke erstrecken sich über zwei bis vier Halbkacheln gleichzeitig. Die mittlere Anzahl an Streifen pro Halbkacheln beträgt 92. Ein Überblick über die Topographie ist in den Abbildungen 4.47 und 4.48 gegeben.

Ergebnisse

Für jeden Teilblock erfolgt, sofern Verknüpfungspunkte gefunden wurden, eine Blockausgleichung. Die Ergebnisse werden genutzt, um jeweils zu entscheiden, ob die Verknüpfungspunkte dieses Teilblocks für die Ausgleichung des gesamten Blocks verwendet werden sollen. Dieser Teil des Verfahrens ist im Ablauf bisher nicht automatisiert und erfolgt manuell anhand von Erfahrungswerten voriger Ausgleichungen.

Wie groß der Anteil der Teilblöcke ist, die jeweils nicht genutzt werden, ist in Abbildung 4.49 dargestellt.
Die meisten Teilblöcke weist MC-11-E auf, da diese Halbkachel eine sehr vollständige Abdeckung besitzt und sich dadurch viele Überlappungen ergeben. Aus den meisten Blöcken müssen, wie auch bei MC-11-E, jeweils einige wenige Streifen entfernt werden. Für diese Streifen werden nach dem Entfernen der ungeeigneten Teilblöcke nicht mehr ausreichend gemeinsame Verknüpfungspunkte mit den überlappenden Nachbarstreifen gefunden. Für 8 der 32 Blöcke können alle Streifen verwendet werden (siehe Abbildung 4.50).

Mit den geeigneten Streifen und Teilblöcken werden für jeden der 32 Blöcke, wie für MC-11-E in Abschnitt 4.3.3, die Blockausgleichung und die anschließende Evaluierung der Orientierungsdatensätze durchgeführt. Da bei der Ausgleichung jeweils einige der Verknüpfungspunkte als Ausreißer entfernt werden, ist vereinzelt eine manuelle Nachbesserung bei der Auswahl der Teilblöcke notwendig, bevor alle vier Schritte der Ausgleichung ohne Komplikationen automatisch abgearbeitet werden können. Letztendlich kann für jeden der Blöcke ein neuer Orientierungsdatensatz (bOD) bereitgestellt werden. Bevor dieser zur Erstellung der Mosaike weitergegeben wird, werden jeweils die Evaluierungen durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt sind.

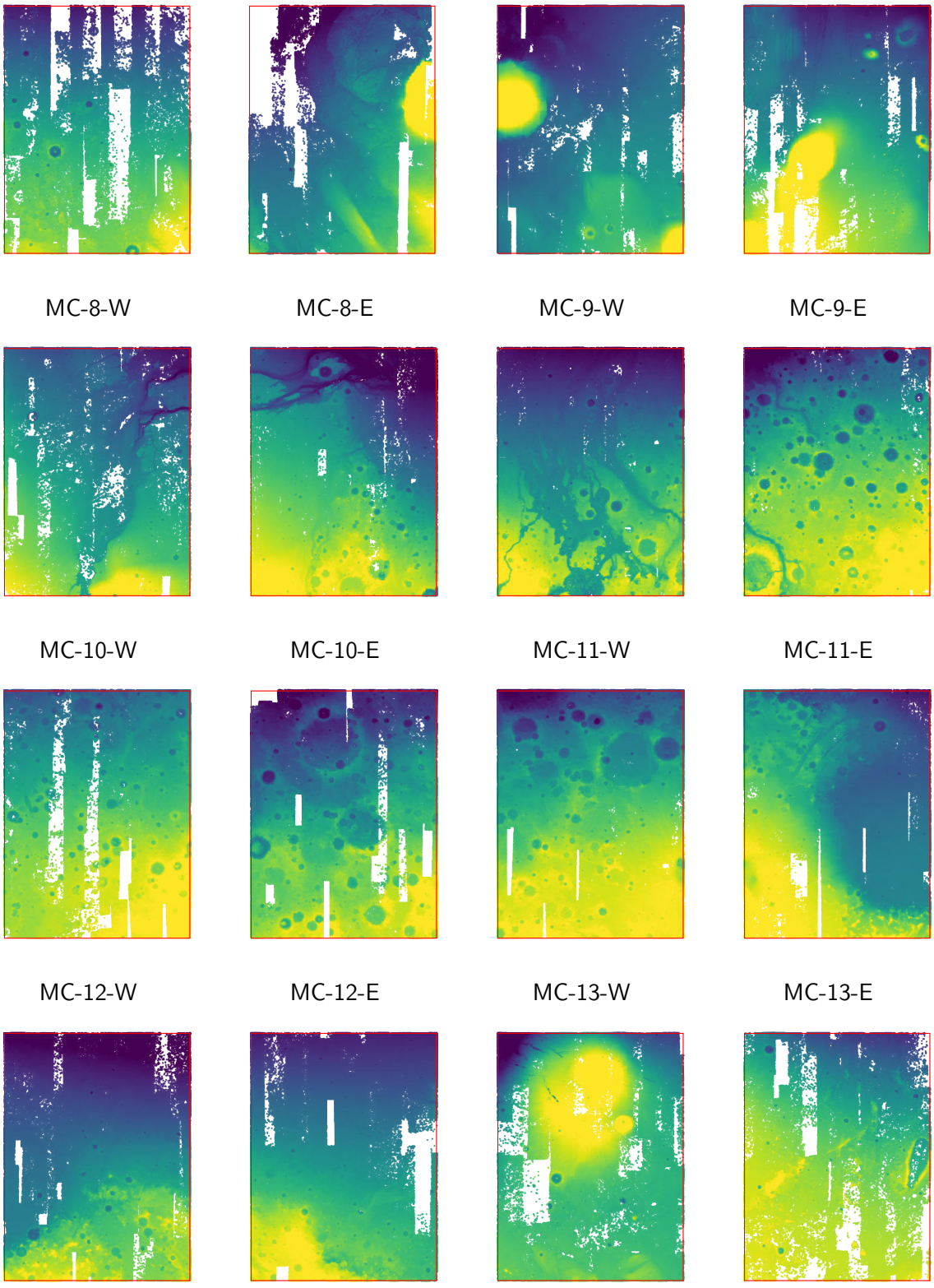
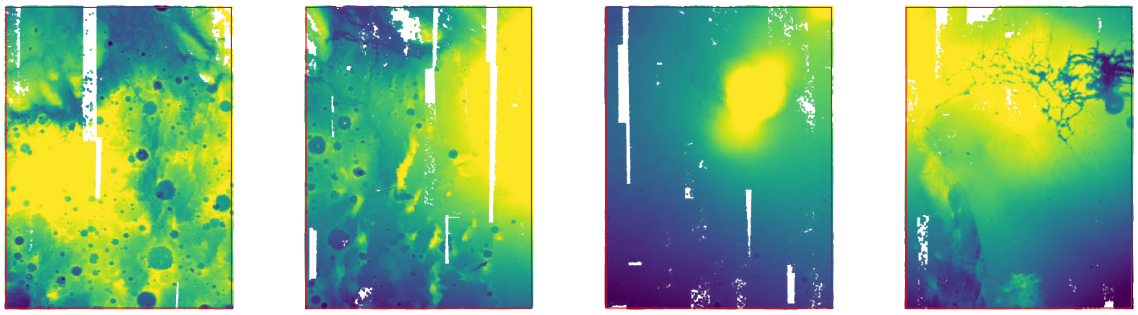
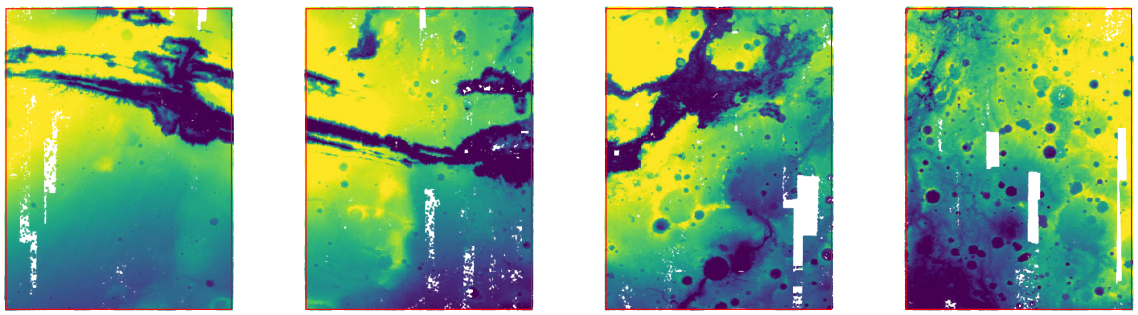


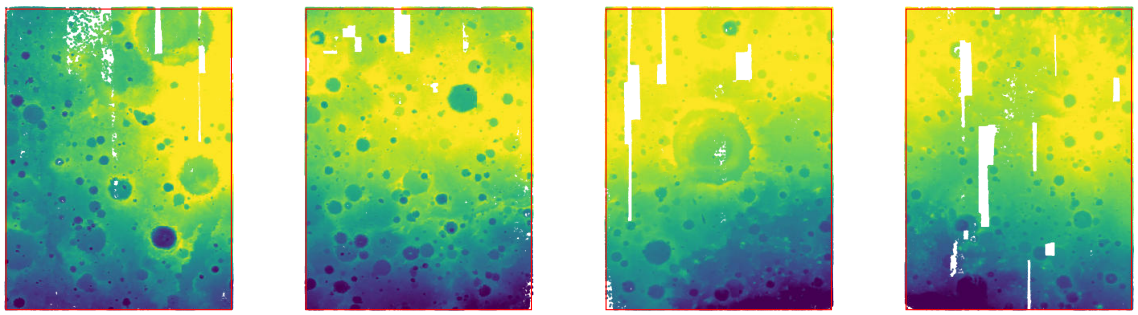
Abbildung 4.47. Topographie und Punktdichte der Halbkacheln MC-8 bis MC-15



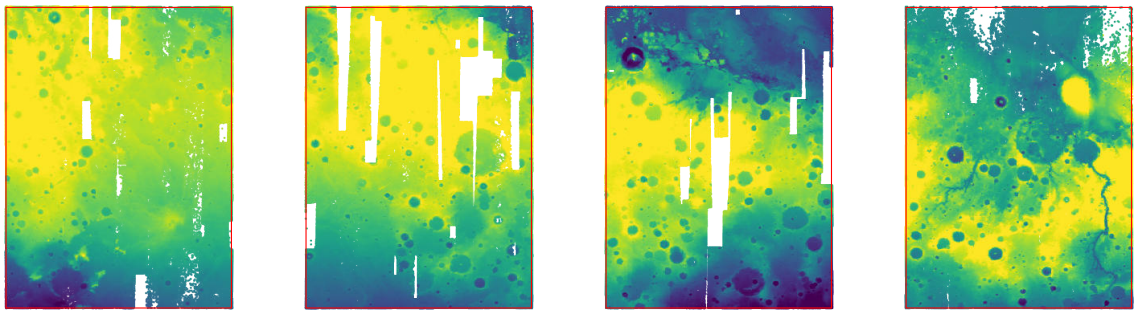
MC-16-W MC-16-E MC-17-W MC-17-E



MC-18-W MC-18-E MC-19-W MC-19-E



MC-20-W MC-20-E MC-21-W MC-21-E



MC-22-W MC-22-E MC-23-W MC-23-E

Abbildung 4.48. Topographie und Punktdichte der Halbkacheln MC-16 bis MC-23

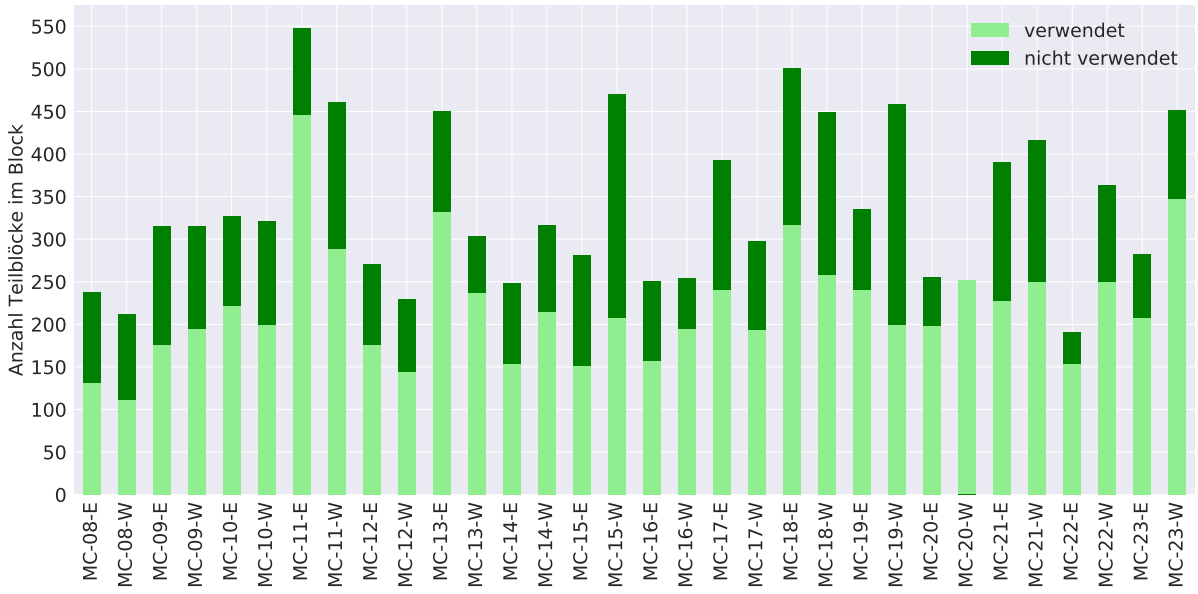


Abbildung 4.49. Anzahl verwendeter bzw. nicht verwendeter Streifenpaare für die 32 Halbkachelblöcke

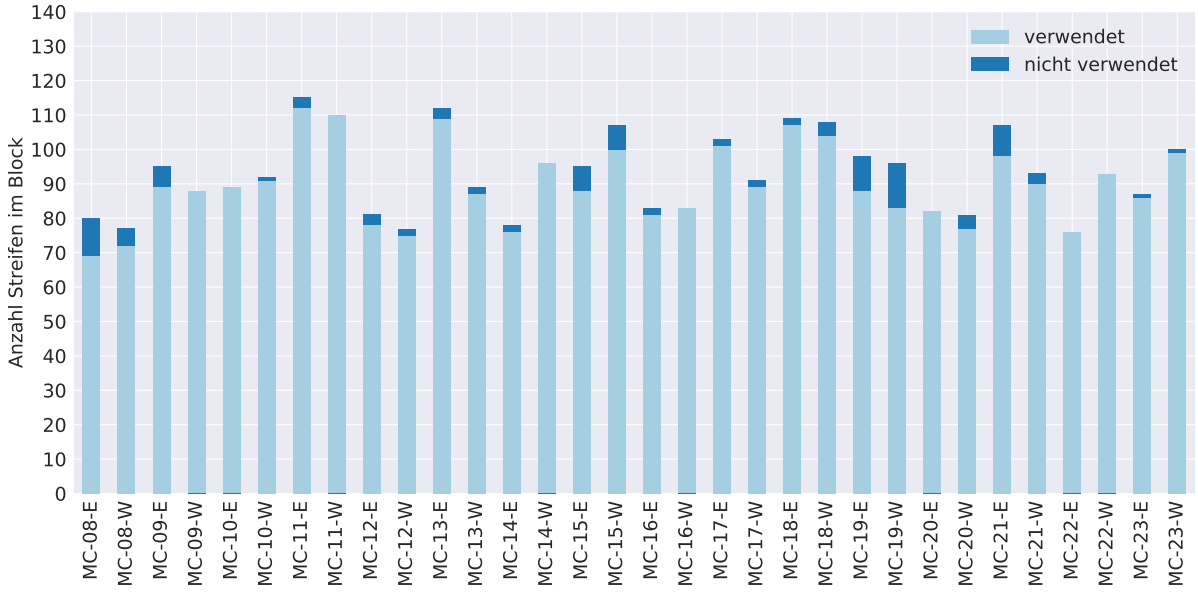


Abbildung 4.50. Anzahl verwendeter bzw. nicht verwendeter Streifen für 32 Halbkachelblöcke

Mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF)

Der zur Beschreibung der Präzision der HRSC-Daten genutzte VSF ist für jeden der 32 Halbkachelblöcke, über alle Punkte des Blocks gemittelt, in Abbildung 4.51 dargestellt.

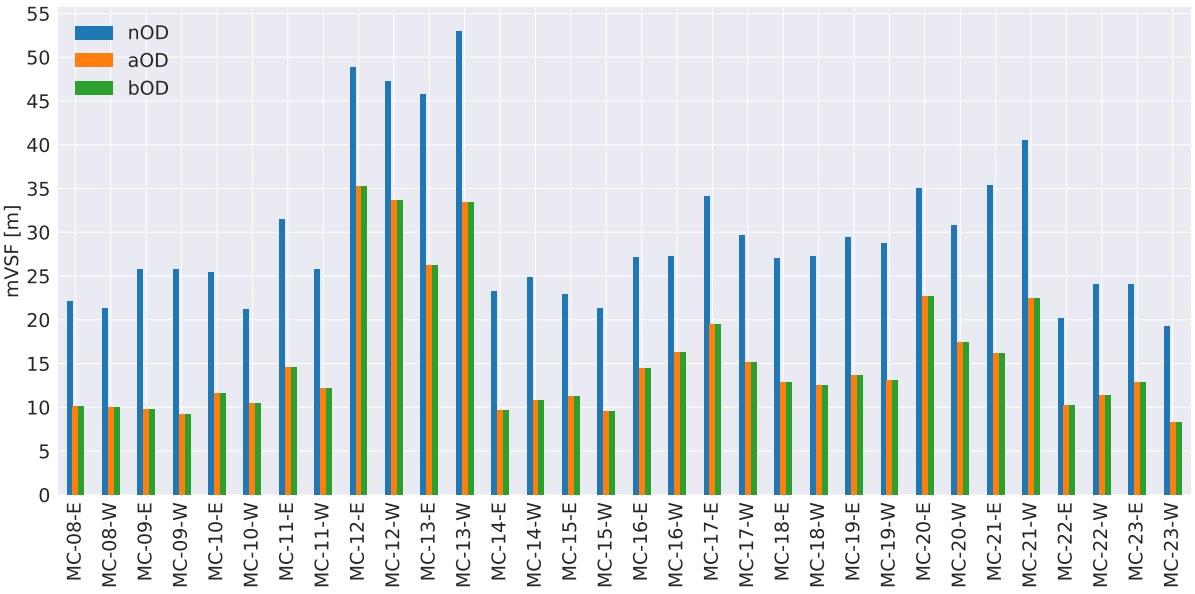


Abbildung 4.51. Mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF) für 32 Halbkachelblöcke; blau: nominelle Orientierungsdaten (nOD); orange: ausgeglichenen Orientierungsdaten (aOD); grün: blockausgeglichene Orientierungsdaten)

Wie zu erwarten, zeigen sich auch für die anderen Blöcke keine Unterschiede zwischen den aOD und bOD. Auffällig hohe Werte sind bei den vier Blöcken MC-12-E, MC-12-W, MC-13-E und MC-13-W zu erkennen: Nicht nur mit den aOD und den bOD, sondern auch mit den nOD sind die VSF-Werte etwa um den Faktor 2 bis 3 höher als bei den anderen Blöcken. Es ist deshalb anzunehmen, dass nicht die Orientierungsdaten, sondern die Bildpunkte, die zur Evaluierung verwendet wurden, die größeren Vorwärtsschnittfehler verursachen. Bezüglich Aufnahmegeometrie und Beleuchtung sind in den Streifen der vier Blöcke jedoch keine Abweichungen von den übrigen Daten zu erkennen. Zur Bestimmung der Bildpunkte wurden außerdem für alle Blöcke die selben Einstellungen verwendet. Als Ursache bleibt also die Beschaffenheit der Oberfläche in den Kacheln MC-12 und MC-13, deren Untersuchung in zukünftigen Arbeiten an dieser Stelle empfohlen wird.

Mittlere HRSC-MOLA-Höhendifferenz (mMDiff)

In Abbildung 4.52 kann wie auch schon in Abschnitt 4.2.3 beobachtet werden, dass sich die Objektpunkte der HRSC-Daten mit den nOD vor der Ausgleichung deutlich unterhalb des MOLA-DGM befinden. Nach der Ausgleichung liegen die HRSC-Daten leicht oberhalb der MOLA-Daten. Als Grund dafür werden Restfehler in den Parametern der inneren Orientierung vermutet. Der Unterschied zwischen aOD und bOD ist jeweils nur sehr gering. Vergleichsweise hohe Differenzen nach den Ausgleichungen liegen in den Halbkacheln MC-18-E, MC-18-W, MC-19-W vor. Auch vor der Ausgleichung sind die MDiff-Werte hier überdurchschnittlich hoch. Es wird daher angenommen, dass die Steilhänge der Valles Marineris, welche durch diese drei Halbkacheln verlaufen, die Evaluierung systematisch beeinflussen. Im Gegensatz dazu haben drei von vier Halbkacheln, in denen sich die großen Vulkane befinden (MC-09-E, MC-09-W, MC-17-W, MC-15-W), jeweils einen etwas niedrigeren mMDiff-Wert.

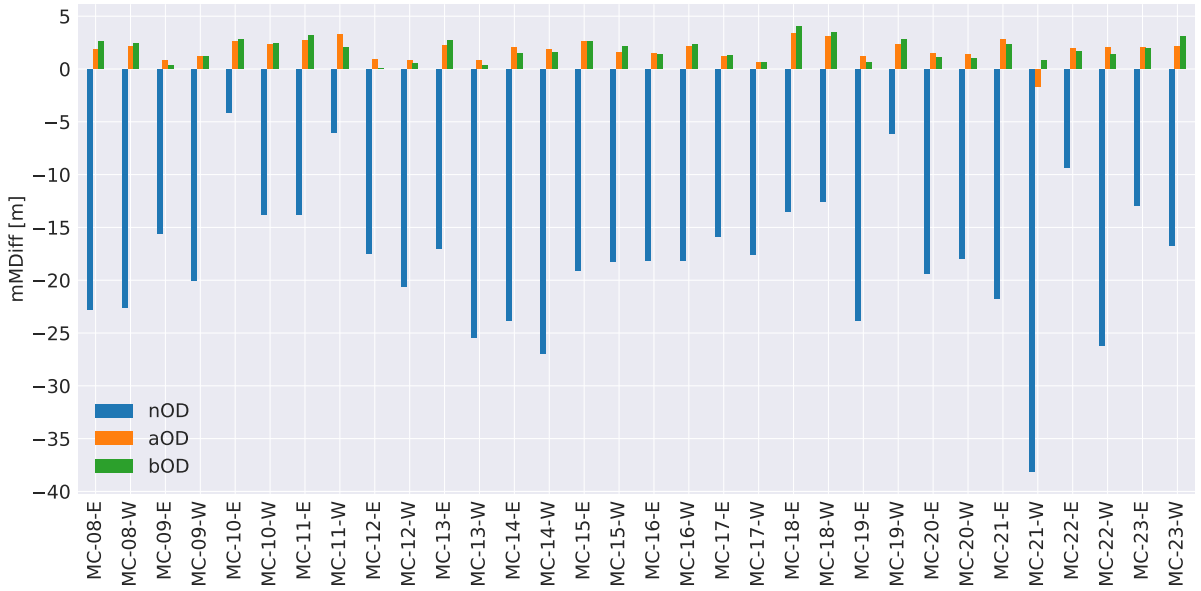


Abbildung 4.52. Mittlere HRSC-MOLA-Differenz nach der Einzelstreifenausgleichung (mMDiffa); blau: nominelle Orientierungsdaten (nOD); orange: ausgeglichene Orientierungsdaten (aOD); grün: blockausgeglichene Orientierungsdaten)

An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei dem mMDiff-Wert um das arithmetische Mittel der Höhendifferenzen (HRSC - MOLA) über alle Punkte im Block handelt. Es werden nicht die Absolutwerte gemittelt. Systematische Höhenabweichungen einzelner Streifen, in positiver oder negativer Richtung, können sich also ausgleichen und sind durch den Mittelwert nicht abgebildet.

Zur Beurteilung der Anpassung an das MOLA-DGM ist daher zusätzlich ein Blick auf die jeweiligen Abbildungen im Anhang notwendig: In Abbildung A.5 und A.6 sind in allen Halbkacheln starke Abweichungen vom MOLA-DGM zu erkennen. In den Abbildungen A.7 und A.8 sind die Abweichungen in den meisten fast gänzlich auf ein sehr geringes Niveau gesunken.

Mittlere Punktdifferenz (mPDiff)

Durch die Gegenüberstellung der jeweils gemittelten PDiff-Werte für drei Orientierungsdatensätze in Abbildung 4.53, werden die Verbesserungen deutlich, die durch die Blockausgleichung für die jeweiligen Blöcke erzielt wurden.

Es fällt dabei auf, dass bei fünf Blöcken (MC-09-E, MC-09-W, MC-14-E, MC-14-W und MC-17-W) der mPDiff-Wert nach der Einzelstreifenausgleichung angestiegen ist. Eine mögliche Erklärung dafür liefert die Topographie. In allen fünf Halbkacheln befinden sich sehr glatte Gebiete. Befinden sich einzelne Streifen in diesen Gebieten ohne ausreichende Höhenvariation, kann durch die Anpassung an das MOLA-DGM keine Verbesserung der Lage, sondern lediglich der Höhe erwartet werden. Erst durch die Blockausgleichung kann die Passgenauigkeit benachbarter Streifen unter Verwendung gemeinsamer Verknüpfungspunkte verbessert werden.

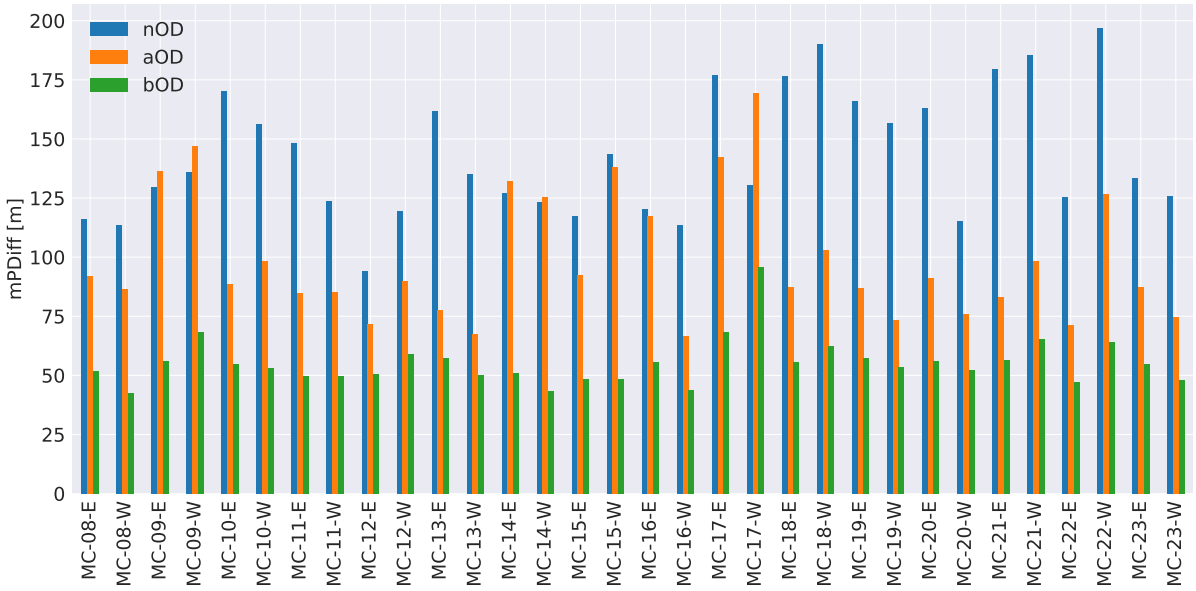


Abbildung 4.53. Mittlere Distanz zwischen Punkten benachbarter Streifen (PDiff); blau: nominelle Orientierungsdaten (nOD); orange: ausgeglichene Orientierungsdaten (aOD); grün: blockausgeglichene Orientierungsdaten)

Im Gegensatz dazu kann in Gebieten, in denen die Oberfläche durch zahlreiche Einschlagskrater sehr rau ist, bereits durch die Einzelstreifenausgleichung eine sehr deutliche Verbesserung der Passgenauigkeit der Streifen erreicht werden. Ein gutes Beispiel dafür sind die beiden Hälften von MC-21. Insgesamt konnte der mPDiff-Wert für alle 32 Blöcke deutlich reduziert und in vielen Fällen sogar halbiert werden. Bei den meisten Blöcken liegt er nun bei rund 50 m. Der ursprüngliche Verdacht, dass der gewählte Ansatz bei der Entwicklung zu sehr an die Daten von MC-11-E angepasst wurde, hat sich nicht bestätigt: Trotz abweichender Voraussetzungen für die Bündelausgleichung, konnten gute Ergebnisse auch für die anderen Blöcke erzielt werden. Zusammenfassend sind in Tabelle 4.19 die drei Qualitätsmaße (mVSF, mMDiff und mPDiff) für die drei Orientierungsdatensätze gemittelt über alle Blöcke dargestellt.

	nOD	**aOD**	**bOD**
mVSF [m]	29,6	15,5	15,5
mMDiff [m]	-18,0	1,8	1,8
mPDiff [m]	142,9	99,0	55,3

Tabelle 4.19. Zusammenfassung der Evaluierungsergebnisse der Orientierungsdaten gemittelt über alle 32 Halbkachelblöcke; mittlerer Vorwärtsschnittfehler (mVSF), mittlere HRSC-MOLA-Höhendifferenz (mMDiff) und mittlere Punktdifferenz (mPDiff); für nominelle Orientierungsdaten (nOD), Orientierungsdaten nach Einzelstreifenausgleichung (aOD) und nach Blockausgleichung (bOD)

4.4. Diskussion der Ergebnisse

Die Frage, ob sich das Verfahren zur Bündelausgleichung, welches in Kapitel 3 vorgestellt wurde, auf den globalen HRSC-Datensatz anwenden lässt, kann mit einem Blick auf die nun vorliegenden Ergebnisse positiv beantwortet werden: Obwohl der globale Datensatz der HRSC-Streifen sehr inhomogen ist, konnte durch eine systematische Verarbeitung bei 4 252 von insgesamt 4 419 Streifen (96,2 %) eine Reduktion des mittleren Vorwärtsschnittfehlers erreicht werden. Die Anpassung an das MOLA-DGM, gemessen mit der mittleren Höhendifferenz, konnte bei 93,6 % der Streifen verbessert werden. Möglich war diese hohe Anzahl an Verbesserungen unter anderem durch die Verwendung einer variablen Orientierungspunktdistanz. Wie die Experimente gezeigt haben, ließ sich dadurch eine Verbesserung auch für Streifen erreichen, bei denen dies mit der bislang üblichen konstanten Distanz nicht möglich war.

Der Ansatz zur Blockausgleichung, welcher ursprünglich anhand des Blocks MC-11-E entwickelt wurde, ließ sich auf alle 31 anderen untersuchten Blöcke übertragen und lieferte gute Ergebnisse. Einen wichtigen Beitrag erzielte dabei der Verknüpfungspunktfilter. So konnte jeweils die Punktanzahl verringert werden, ohne dabei für die Ausgleichung wichtige Verknüpfungen aufzulösen. Die relative Orientierung der Streifen, gemessen an gemeinsamen Objektpunkten, konnte deutlich verbessert werden: Gemittelt über die 32 Blöcke war eine beachtliche Reduktion von ursprünglich 142,9 m auf 55,3 m möglich. Die systematische Evaluierung zeigte dabei u.a., dass Topographie und Geländeoberfläche vor allem Einfluss auf die Einzelstreifenausgleichung haben. Der mVSF und die mMDiff verschlechterten sich durch die Blockausgleichung nicht. Dieses war eine wichtige Anforderung an das Verfahren.

Aus praktischer Sicht lohnt sich außerdem ein Blick auf die anfangs gestellte Frage, ob es möglich sei, für den gesamten Ablauf Stellgrößen zu finden, die grundsätzlich für alle HRSC-Daten verwendet werden können. Mit den Ergebnissen der durchgeführten Experimente lässt sich nun auch dieses eindeutig positiv beantworten: Die beispielhaft für einen Streifen (siehe Abschnitt 4.2.1) und für einen kleinen Block (siehe Abschnitt 4.3.1) beschriebenen Einstellungen und Stellgrößen ließen sich auch für die anderen Daten verwenden. Die empirisch ermittelte Punktdichte erwies sich bei der Einzelstreifenausgleichung des globalen Datensatzes als sinnvoll. Eine geeignete Rasterzellengröße, welche die resultierende Anzahl der Punkte des Verknüpfungspunktfilters beschränkt, konnte ebenfalls empirisch durch Testreihen ermittelt werden. Dabei wurde ein Kompromiss gefunden, mit dem die reduzierten Verknüpfungspunkte das Ergebnis nur marginal beeinträchtigen, jedoch die Blockausgleichung beachtlich beschleunigen. Dadurch war es möglich, alle Experimente in angemessener Zeit durchzuführen.

Da die HRSC-Mission auch zum aktuellen Zeitpunkt noch regelmäßig neue Daten liefert, ist ein weiterer, praktischer Aspekt zu betonen: Neue, in Zukunft verfügbare Daten können schnell verarbeitet und bei Bedarf in die existierenden Blöcke integriert werden. So ist es möglich, die zum Teil noch vorhandenen Lücken in den Mosaiken zu füllen.

Schließlich konnte anhand der durchgeführten Experimente auch die Frage beantwortet werden, welche Genauigkeiten bei der photogrammetrischen Auswertung der HRSC-Aufnahmen zu erwarten sind. Sowohl die Ergebnisse der Einzelstreifenausgleichung, als auch die der Blockausgleichung wurden für alle Streifen evaluiert. Ein Mittelwert von 15,5 m, der sich bei der Auswertung der Blöcke für den mVSFa ergab, entspricht dem, was angesichts der Objektpixelgröße und der Bildqualität erwartet werden kann. Die 29,6 m vor der Ausgleichung waren, bezogen auf die nominelle Auflösung der HRSC-Daten von 12,5 m deutlich zu hoch.

5. Fazit

5.1. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Bündelausgleichung der Aufnahmen der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) wurde in dieser Arbeit ein Verfahren beschrieben, welches die systematische Verarbeitung von photogrammetrischen Blöcken ermöglicht. Durch eine Weiterentwicklung des Ansatzes zur mathematischen Modellierung der Aufnahmen einer Zeilenkamera konnte die Genauigkeit bei der Rekonstruktion der äußeren Orientierung der Bildstreifen im Mittel deutlich gesteigert werden. Neu entwickelte Konzepte bei der Bestimmung der Verknüpfungspunkte erlauben erstmals die systematische und automatische Bündelausgleichung großer Blöcke. Die Anwendbarkeit des Verfahrens konnte im experimentellen Teil dieser Arbeit aufgezeigt werden: Die Bündelausgleichung von 32 Blöcken, die jeweils aus rund 90 Streifen zusammengesetzt waren, verbesserte die jeweiligen Orientierungsdaten deutlich. Mit diesen neuen Daten können aus den HRSC-Aufnahmen einzigartige Mosaike erstellt werden. Mit einer Auflösung von 12,5 m für die panchromatischen Bildmosaike und 50 m für die Farbbild- und DGM-Mosaike zählen sie zu den am höchsten aufgelösten Daten, die von der Marsoberfläche flächendeckend vorliegen. Sie bieten - und das ist besonders hervorzuheben - gleichzeitig eine geometrische Konsistenz für ein großes Gebiet. Die behandelten MC-30-Halbkacheln decken jeweils eine Fläche von rund 1330 km in Ost-West-Richtung und 1780 km in Nord-Süd-Richtung ab. Die Mosaike erlauben, beispielsweise in der Geologie, zukünftig Forschungen mit einem deutlich größeren Kontext als es bislang möglich war. Auch zur präzisen geodätischen Referenzierung anderer Daten eignen sich diese regionalen HRSC-Datensätze: In der Bündelausgleichung wurden sie an das MOLA-DGM angepasst. Dadurch kann nun indirekt auch für sehr hochaufgelöste Daten der Bezug zu einem globalen Referenzsystem hergestellt werden, indem eine Anpassung an die HRSC-Mosaike erfolgt. Die Mosaike bilden in den kommenden Jahrzehnten die Grundlage für eine hochgenaue Kartierung der Marsoberfläche.

Um die dafür erforderliche Genauigkeit in der Bündelausgleichung der HRSC-Blöcke zu erreichen, mussten bisher ungelöste photogrammetrische Fragestellungen behandelt werden: Da es sich bei der HRSC um eine Zeilenkamera handelt, entstehen die streifenartigen Aufnahmen über mehrere Minuten. Durch vorherige Manöver des Raumschiffs kommt es bei *Mars Express* teilweise zu Schwingungen, welche die Blickrichtung der Kamera beeinflussen. Diese Störungen sind durch den Aufnahmeprozess in den Bildern enthalten, werden in den Orientierungsdaten jedoch nicht erfasst. Zur Modellierung dieser Schwingungen wurde das Konzept der Orientierungspunkte aufgegriffen. Über diese Punkte werden im funktionalen Modell der Ausgleichung die Parameter der äußeren Orientierung interpoliert. Der Ansatz wurde dahingehend erweitert, dass die Distanz zwischen den Punkten innerhalb eines Streifen variieren kann und sie sich vor der Ausgleichung an die lokal verfügbare Anzahl der Verknüpfungspunkte anpasst.

Als weiterer methodischer Schwerpunkt wurde sich in dieser Arbeit mit der Bestimmung der Verknüpfungspunkte, die für die systematische Bündelausgleichungen großer Blöcke notwendig sind, befasst. Bestehende Ansätze zur automatischen Bestimmung von Verknüpfungspunkten und deren Nutzung als Beobachtungen in einer gemeinsamen Bündelausgleichung mit dem MOLA-DGM wurden erweitert. Darauf aufbauend wurde ein mehrteiliger photogrammetrischer Prozess zum systematischen und automatischen Verarbeiten der HRSC-Daten entwickelt. Der Fokus wurde dabei von der Verarbeitung einzelner Streifen auf die Verarbeitung großer Blöcke verschoben.

Die Bündelausgleichung wurde in zwei Stufen unterteilt: Zunächst werden in einer Einzelstreifenausgleichung die Blickwinkel der Kamera rekonstruiert. Diese Komponente der äußeren Orientierung wird in der zweiten Stufe, der Blockausgleichung, beibehalten. Zusätzlich wird die Position aller Streifen relativ zueinander und mit Bezug zum MOLA-DGM gemeinsam optimiert. Die dafür benötigten Verknüpfungspunkte werden dabei in Teilblöcken bestimmt. Dabei hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn Teilblöcke von je zwei Streifen gebildet werden. Da die Streifen im Block keine strukturierte Anordnung aufweisen und sich die überlappenden Streifen aufgrund des Bildinhalts unterschiedlich gut zur gemeinsamen Verknüpfungspunktbestimmung eignen, ist die Verteilung der Verknüpfungspunkte im gesamten Block teils sehr inhomogen. Zur Homogenisierung der Verteilung wurde ein Verknüpfungspunktfilter entwickelt und in dieser Arbeit vorgestellt. Er erlaubt, die Anzahl der Punkte unter Beibehaltung der geometrischen Stabilität des Blocks zu reduzieren und führt zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Punkte im Objektraum.

Konzeptionell dem zweistufigen Ansatz folgend, wurde auch die Durchführung der Experimente zur Bündelausgleichung in zwei Stufen aufgeteilt. Die Stellgrößen des Verfahrens wurden dabei so gewählt, dass für alle Daten gute Ergebnisse erzielt werden konnten, ohne eine individuelle Anpassung vorzunehmen. Somit kann das Verfahren auch für die Bündelausgleichung zukünftiger Daten automatisiert eingesetzt werden. Für die Einzelstreifenausgleichung konnten die Stellgrößen zur Verteilung der Orientierungspunkte so gewählt werden, dass auch für Streifen, in denen sowohl Schwingungen als auch texturarme Regionen auftreten, gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Gleichzeitig wurden benötigte Rechenzeiten kurz gehalten, indem eine Anpassung der Stellgrößen an die Länge der Streifen und die vorhandene Verteilung der Verknüpfungspunkte erfolgte. Für die Blockausgleichung konnte empirisch eine Rasterweite des Verknüpfungspunktfilters ermittelt werden, die einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Qualität der Ergebnisse und den benötigten Rechnerressourcen darstellt.

Von den 4 418 verfügbaren Streifen haben sich 4 322 (97,8 %) als für das Verfahren geeignet erwiesen. Bei 4 252 Streifen (96,2 %) konnte durch die Bündelausgleichung eine Reduktion des mittleren Vorwärtsschnittfehlers erzielt werden. Die Passgenauigkeit zum MOLA-DGM konnte bei 4 046 Streifen (93,6 %) verbessert werden. Brachte die Bündelausgleichung keine Verbesserung der Orientierungsdaten, lagen in der Regel Daten vor, welche grundsätzlich nicht zur photogrammetrischen Auswertung geeignet sind, in den meisten Fällen aufgrund zu schlechter Bildqualität. Hervorzuheben ist, dass eine nicht unerhebliche Anzahl an Streifen vor der Ausgleichung eine sehr geringe Objektpunktgenauigkeit mit großen Vorwärtsschnittfehlern aufwies. Dieses zeigte sich auch darin, dass bei 10% der 4 322 Streifen eine Verbesserung um mehr als das 3,6-Fache erreicht werden konnte (siehe Abschnitt 4.2.3). Erst mit den neuen Orientierungsdaten konnten mit diesen Streifen Objektpunkte auf dem Genauigkeitsniveau der anderen Streifen berechnet werden.

Auch die Passgenauigkeit zum MOLA-DGM zeigte mit den nominellen Orientierungsdaten teils sehr große Abweichungen, sodass bei 10% der Streifen eine Verbesserung von über 68 m erzielt werden konnte. Die Abbildungen im Anhang zeigen deutlich, dass erst durch die Ausgleichung eine hohe Homogenität der Objektpunktgenauigkeit hergestellt werden konnte. Mit den neuen Orientierungsdaten sind die Streifen gut für die Erstellung der Mosaike geeignet.

Die zweite Stufe des Verfahrens, welche zur Verbesserung der Passgenauigkeit der Streifen untereinander erfolgte, konnte zunächst anhand des Blocks MC-11-E erfolgreich eingesetzt werden (siehe 4.3.3): Von 115 Streifen, welche den Bereich der Halbkachel MC-11-E überdecken, ließen sich die Bilder von 112 Streifen in die Blockausgleichung integrieren. Für das anschließend beim DLR erstellte Mosaik wurden 110 dieser 112 Streifen verwendet. Durch die Verwendung des Verknüpfungspunktfilters konnte die Laufzeit für die Ausgleichung des gesamten Blocks deutlich reduziert werden.

Die Ergebnisse der Evaluierung zeigten, dass weder die Objektpunktgenauigkeit noch die Anpassung an das MOLA-DGM durch die Blockausgleichung verschlechtert wurden. Für das dritte Qualitätsmaß, die Passgenauigkeit der Streifen, konnte eine deutliche Verbesserung erreicht werden, sowohl im Vergleich zu den nominellen Orientierungsdaten, als auch zu denen nach der Einzelstreifenausgleichung.

Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Halbkacheln konnte anhand der Ergebnisse 31 weiterer Blockausgleichungen nachgewiesen werden. Für alle Blöcke konnten die Orientierungsdaten deutlich verbessert werden. Durch die gemeinsame Ausgleichung der Streifen als Block konnte eine durchschnittliche Verbesserung der Passgenauigkeit um einen Faktor größer als 2,5 erzielt werden. Die mittlere Distanz zwischen Objektpunkten benachbarter Streifen reduzierte sich im Mittel über alle 32 Blöcke von 142,9 m auf 55,3 m.

5.2. Ausblick

Mit dem entwickelten Verfahren für die Bündelausgleichung der HRSC-Daten lassen sich bereits gute Ergebnisse erzielen. Dieses wurde in den Experimenten in Kapitel 4 deutlich. Dennoch verbleiben einige offene Punkte, die in zukünftigen Arbeiten betrachtet werden können:

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurden alle vor dem 31. Oktober 2018 aufgenommen. Seitdem hat die HRSC 215 neue Streifen aufgenommen (Stand Dezember 2019), die sich photogrammetrisch auswerten und voraussichtlich in die Halbkachelblöcke integrieren lassen. Nach derzeitigem Stand liefert die HRSC auch in Zukunft weiterhin regelmäßig neue Aufnahmen. Diese sollten in die Blöcke, welche in dieser Arbeit erstellt wurden, integriert werden. So können verbleibende Lücken (siehe Abbildung 4.47 und 4.48) geschlossen oder Bereiche mit unzureichender Bildqualität durch einen Austausch von Streifen in den Halbkachel-Blöcken nachgebessert werden. Damit kann die Qualität der Mosaike weiter verbessert werden. Alternativ kann eine genauere Betrachtung der vorhandenen Streifen sinnvoll sein. Streifen, welche sich nicht in die Blöcke integrieren ließen (siehe Abbildung 4.50) könnten nach einer Anpassung der Stellgrößen im Verfahren potenziell nutzbar gemacht werden und die Vollständigkeit der Blöcke erhöhen.

Ein nächster logischer Schritt ist die systematische Untersuchung der Passgenauigkeit an den Schnittkanten der Halbkachelblöcke. Streifen, welche die Grenzen der Halbkacheln schneiden, sind in mehreren Blöcken enthalten. Es existieren also jeweils mehrere Orientierungsdatensätze. Nutzt man diese, um jeweils Objektpunkte zu bestimmen, lässt sich durch Punktdifferenzen die Passgenauigkeit zwischen den Blöcken evaluieren. Erste Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass dabei ähnliche Abweichungen wie zwischen benachbarten Streifen, innerhalb der Blöcke erreicht werden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Mosaike verzerrungsfrei und lagerichtig sind. Eine systematische, globale Analyse steht jedoch noch aus.

Ein weiterer anstehender Punkt ist die erneute Überprüfung der inneren Orientierung der HRSC. Da sich nun auch große Blöcke systematisch verarbeiten lassen, kann der Einfluss geänderter Parameter der inneren Orientierung besser untersucht werden. So konnte bereits ein kleiner, jedoch signifikanter Maßstabsfehler aufgedeckt werden, welcher zu einer Verzerrung der Blöcke geführt hat. Durch Anpassung der Parameter konnte dieser reduziert werden. Jedoch ließen sich, mangels ausreichend genauer Referenzinformation, nicht alle Parameter der inneren Orientierung unabhängig bestimmen. Eine bessere Bestimmbarkeit kann mit Streifen erreicht werden, welche sich orthogonal kreuzen. Diese liegen ausschließlich in den Polregionen vor. Eine Herausforderung bei der Auswertung dieser Streifen wird die Geländeoberfläche sein, welche abhängig von den Jahreszeiten stark variiert.

Bei den systematischen Blockausgleichungen in Abschnitt 4.3.3 wurden 32 Blöcke verwendet, welche am Äquator zwischen 30° nördlicher und südlicher Breite liegen. Oberhalb und unterhalb dieser Breitengrade befinden sich jeweils zwölf weitere Halbkachelblöcke sowie je ein Block am Nord- und am Südpol (siehe Abbildung 3.9). Auch wenn diese Bereiche für aktuelle und geplante Landemissionen weniger relevant sind, so ist für andere Fragestellungen eine systematische Kartierung durch die Bereitstellung regionaler HRSC-Mosaike auch für diese Bereiche anzustreben. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Bündelausgleichung der Blöcke lässt sich grundsätzlich auch dort anwenden.

Die vorläufigen Untersuchungen der HMC30-Halbkacheln haben auf eine hohe gegenseitige Passgenauigkeit hingedeutet. Dennoch lohnt es sich, zukünftig der Fragestellung nachzugehen, ob die HRSC-Daten als globaler Block in einer gemeinsamen Bündelausgleichung verwendet werden können. Dazu könnte der zweistufige Ansatz durch eine dritte Stufe erweitert werden. In dieser könnten die Streifen regionaler Halbkachelblöcke durch gemeinsame Positionsparameter in einem globalen areozentrischen Koordinatensystem verschoben werden und so die Passgenauigkeit an den Blockgrenzen durch die Bündelausgleichung weiter gesteigert werden.

Literaturverzeichnis

Ackermann, F. (1984). Utilization of navigation data for aerial triangulation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25:1–9. 16

Ackermann, F., Bodechtel, J., Lanzl, F., Meissner, D., Seige, P., und Winkenbach, H. (1989). MOMS-02 ein multispektrales Stereo Bildaufnahmesystem für die zweite deutsche Spacelab Mission D2. *Geo-Information-Systems*, 2(3):5–11. 17

Albertz, J., Attwenger, M., Barrett, J., Casley, S., Dorninger, P., Dorrer, E., Ebner, H., Gehrke, S., Giese, B., Gwinner, K., Heipke, C., Howington-Kraus, E., Kirk, R., Lehmann, H., Mayer, H., Muller, J.-P., Oberst, J., Ostrovskly, A., Renter, J., Reznik, S., Schmidt, R., Scholten, F., Spiegel, M., Stilla, U., Wählisch, M., Neukum, G., und das HRSC Co-Investigator Team (2005). HRSC on Mars Express - Photogrammetric and cartographic research. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(10):1153–1166. 17

Albertz, J., Ebner, H., Heipke, C., Neukum, G., und Scholten, F. (1993). The camera experiments HRSC and WAOSS on the Mars 94 mission. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29:130. 17, 22

Archinal, B. A., Lee, E. M., 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*, 35(B4):863–868. 20

Arya, A. S., Rajasekhar, R. P., Chauhan, P., Sarkar, S. S., Manthira Moorthi, S., Patel, V., Roy, S., Misra, I., Kaur Gambhir, R., Patel, K. K., Lele, A., Kiran Kumar, A. S., Gambhir, R. K., und Patel, K. K. (2014). Mars Color Camera Onboard Mars Orbiter Mission: Scientific Objectives and Earth Imaging Results. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Band 45, Seite 2449. 21

Batson, R. M. (1990). Map formats and projections used in planetary cartography. *Planetary Mapping. Cambridge University Press*. 25, 41

Bostelmann, J., Breitkopf, U., und Heipke, C. (2017). Optimizing the distribution of tie points for the bundle adjustment of hrsc image mosaics. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(3/W1):15–22. 87

Bostelmann, J. und Heipke, C. (2011). Modeling spacecraft oscillations in HRSC images of Mars Express. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band 38-4/W19, Seiten 51–56. 62, 63

Bostelmann, J. und Heipke, C. (2014). Analyzing a block of HRSC image strips for a simultaneous bundle adjustment. In *ISPRS - Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band 2 (4), Seiten 15–20. 31

Bostelmann, J. und Heipke, C. (2016). Global Bundle Adjustment With Variable Orientation Point Distance for Precise Mars Express Orbit Reconstruction. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band 41 (B4), Seiten 361–368. 57, 68

Brown, D. (1976). The Bundle Adjustment - Progress and prospects. In *International Archives of Photogrammetry*, Band 21(3). 15

Carsenty, U., Flohrer, J., Jobs, D., Matz, K. D., Sebastian, I., und Wesemann, K. (1997). HRSC FM1 and FM2 Calibration Document (Final Report). Technischer bericht, TN-WM-5000 PE/007, DLR Institut für Planetenerkundung, Berlin-Adlershof. 24

Cremonese, G., Simioni, E., Re, C., Mudric, T., Lucchetti, A., Massironi, M., Pommerol, A., Roloff, V. A., Mege, D., Pajola, M., und Weitere (2017). First Mars Surface Stereo Reconstruction with the CaSSIS Stereo Camera. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Band 48, Seiten 6–7. 21

Dumke, A., Spiegel, M., Schmidt, R., Michael, G., und Neukum, G. (2008). Mars: High resoluition digital terrain model and ortho-image mosaic on the basis of MEX/HRSC data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 37/4, Seiten 1037–1042. 25

Dumke, a., Spiegel, M., van Gasselt, S., Neu, D., und Neukum, G. (2010). Systematic Processing of High-Resolution Digital Terrain Model Quadrangels on the Basis of Mars-Express HRSC Data. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Band 41, Seite 1980. 25

Ebner, H. (1976). Self calibrating block adjustment. *Bildmessung und Luftbildwessen*, 44:128–139. 16

Ebner, H. und Strunz, G. (1988). Combined point determination using digital terrain models as control information. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 27(B11/3):578–587. 16

Edmundson, K. L., Cook, D. A., Thomas, O. H., Archinal, B. A., und Kirk, R. L. (2012). Jigsaw: The ISIS3 bundle adjustment for extraterrestrial photogrammetry. *ISPRS - Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(4):203–208. 17

Fraser, C. S. und Hanley, H. B. (2003). Bias Compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1):53–57. 18

Gambicorti, L., Piazza, D., Pommerol, A., Roloff, V., Gerber, M., Ziethe, R., El-Maarry, M. R., Weigel, T., Johnson, M., Vernani, D., Others, Pelo, E., Da Deppo, V., Cremonese, G., Ficai Veltroni, I., Thomas, N., und Weitere (2016). The CaSSIS imaging system: optical performance overview. In *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*, Band 9904. International Society for Optics and Photonics. 21

Golombek, M., Kipp, D., Warner, N., Daubar, I. J., Fergason, R., Kirk, R. L., Beyer, R., Huertas, A., Piqueux, S., Putzig, N. E., und Others (2017). Selection of the InSight landing site. *Space Science Reviews*, 211(1-4):5–95. 41

Grün, A. (1978). Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection of gross errors. *Inform. Relative to Cartography and Geodesy. Ser. 2: Transl. p 113-140(SEE N 80-12455 03-43)*. 16

Gwinner, K., Bostelmann, J., Dumke, A., Michael, G., Annibali, S., Stark, A., Kersten, E., Walter, S., Roatsch, T., und Jaumann, R. (2019). Characteristics of the HRSC Mars Chart (HMC-30) and its Quality of Co-Registration with the MOLA Reference. *EPSC*, 2019. 25, 26

Gwinner, K., Jaumann, R., Bostelmann, J., Dumke, A., Elgner, S., Heipke, C., Kersten, E., Michael, G., Preusker, F., Roatsch, T., Schmidt, R., Scholten, F., Spiegel, M., van Gasselt, S., Walter, S., the HRSC Global Topography and Mosaic Generation Task Group, und Others (2015). The

first Quadrangle of the Mars Express HRSC Multi-Orbit Data Products (MC-11-E). In *European Planetary Science Congress EPSC2015-672*, Band 10, Seiten 11–12. 26, 100

Gwinner, K., Jaumann, R., Hauber, E., Hoffmann, H., Heipke, C., Oberst, J., Neukum, G., Ansan, V., Bostelmann, J., Dumke, A., Elgner, S., Erkeling, G., Fueten, F., Hiesinger, H., Hoekzema, N. M., Kersten, E., Loizeau, D., Matz, K.-D. D., McGuire, P. C., Mertens, V., Michael, G., Pasewaldt, A., Pinet, P., Preusker, F., Reiss, D., Roatsch, T., Schmidt, R., Scholten, F., Spiegel, M., Stesky, R., Tirsch, D., van Gasselt, S., Walter, S., Wählisch, M., und Willner, K. (2016). The High Resolution Stereo Camera (HRSC) of Mars Express and its Approach to Science Analysis and Mapping for Mars and its Satellites. *Planetary and Space Science*, 126:93–138. 19, 24, 25, 26, 41, 62

Gwinner, K., Scholten, F., Preusker, F., Elgner, S., Roatsch, T., Spiegel, M., Schmidt, R., Oberst, J., Jaumann, R., und Heipke, C. (2010). Topography of Mars from global mapping by HRSC high-resolution digital terrain models and orthoimages: Characteristics and performance. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3-4):506–519. 18, 25, 38, 39, 62

Hechler, M. und Yáñez, A. (2000). Mars Express - Consolidated Report on Mission Analysis Issue 2.0. 60

Heipke, C., Oberst, J., Albertz, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J. R., Kirk, R. L., Mayer, H., Muller, J. P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählisch, M., und Neukum, G. (2007). Evaluating planetary digital terrain models-The HRSC DTM Test. *Planetary and Space Science*, 55(14):2173–2191. 37

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. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band 24 (3), Seiten 216–227. 17

Jacobsen, K. (1980). *Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 102, Hannover. 16

Jaumann, R., Tirsch, D., Hauber, E., Ansan, V., Di Achille, G., Erkeling, G., Fueten, F., Head, J., Kleinhans, M., Mangold, N., u a. (2015). Quantifying geological processes on Mars—Results of the high resolution stereo camera (HRSC) on Mars Express. *Planetary and Space Science*, 112:53–97. 19

Kersten, E., Gwinner, K., Michael, G., Bostelmann, J., Dumke, A., Wählisch, M., Jaumann, R., Generation, M., und Group, T. (2018). Topographic mapping of the Mars MC quadrangles using HRSC data. In *European Planetary Science Congress*, Band 12, Seiten 4–5. 26

Kirk, R. L., Howington-Kraus, E., Galuszka, D., Redding, B., Hare, T. M., Heipke, C., Oberst, J., Neukum, G., Team, H. C.-I., und Others (2006). Mapping Mars with HRSC, ISIS, and SOCET SET. In *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, Band 37, Seiten 4–5. 17

Kornus, W. (1999). *Dreidimensionale Objektrekonstruktion mit digitalen Dreizeilenscannerdaten des Weltraumprojekts MOMS-02/D2*. Dissertation, DGK-C, Nr. 496, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag C. H. Beck, München. 17

Krupnik, A. (1994). *Multiple-patch matching in the object space for aerotriangulation*. Dissertation, Report No. 428, Dept. of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio. 35

Lanzl, F. (1986). The Monocular Electro-Optical Stereo Scanner (MEOSS) Space Experiment. In *Laser/Optoelektronik in der Technik/Laser/Optoelectronics in Engineering*, Seiten 605–608. Springer. 17

Levinthal, E., Green, W., Cutts, J., Jahelka, E., Johansen, R., Sander, M., Seidman, J., Young, A., und Soderblom, L. (1973). Mariner 9—Image processing and products. *Icarus*, 18(1):75–101. 20

Michael, G., Walter, S., Kneissl, T., Zuschneid, W., Gross, C., McGuire, P., Dumke, A., Schreiner, B., van Gasselt, S., Gwinner, K., und Jaumann, R. (2016). Systematic processing of Mars Express HRSC panchromatic and colour image mosaics: Image equalisation using an external brightness reference. *Planetary and Space Science*, 121:18–26. 26

Michael, G., Walter, S., Mcguire, P., Kneissl, T., van Gasselt, S., Gross, C., Schreiner, B., Zuschneid, W., Gasselt, S. V., Gross, C., Schreiner, B., Sensing, R., und Berlin, F. U. (2015). Systematic Processing of Mars Express HRSC Image Mosaic Quadrangles. In *46th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract #2387*, Houston. 25

Müller, F. (1991). *Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bildern digitaler Dreizeilenkameras*. Dissertation, DGK-C, Nr. 372, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag C. H. Beck, München. 17, 40

Neukum, G., Jaumann, R., und das HRSC Co-Investigator Team (2004). HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars express. *Mars Express: The Scientific Payload, Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA-SP*, 1240:17–36. 19

Oberst, J., Schwarz, G., Behnke, T., Hoffmann, H., Matz, K.-D., Flohrer, J., Hirsch, H., Roatsch, T., Scholten, F., Hauber, E., Brinkmann, B., Jaumann, R., Williams, D., Kirk, R., Duxbury, T., Leu, C., und Neukum, G. (2008). The imaging performance of the SRC on Mars Express. *Planetary and Space Science*, 56(3-4):473–491. 24

Ohlhof, T. (1996). *Lokale, regionale und globale Punktbestimmung mit Dreizeilenbilddaten und Bahninformationen der Mars 96-Mission*. Dissertation, DGK-C, Nr. 445, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag C. H. Beck, München. 17

Poli, D. (2005). *Modelling of spaceborne linear array sensors*. Dissertation, IGP Report No. 85, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. 18

Poli, D. und Toutin, T. (2012). Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors. *The Photogrammetric Record*, 27:58–73. 18

Rosenholm, D. A. N. und Torlegard, K. (1988). Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(10):1385–1389. 16

Schmid, H. (1958). Eine allgemeine analytische Lösung fur die Aufgabe der Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen*, Seite 103–113. 15

Schmidt, R. (2008). *Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten für HRSC-Bilder der Mars Express-Mission*. Dissertation, DGK-C, Nr. 623, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag C. H. Beck, München. 33, 34, 42, 51, 55, 57, 60, 63

Schmidt, R., Bostelmann, J., und Heipke, C. (2017). *Planetare Fernerkundung, In: Photogrammetrie und Fernerkundung*, Seiten 373–429. Springer, Berlin, Heidelberg. 23

Scholten, F., Gwinner, K., Roatsch, T., Matz, K., Wahlisch, M., Giese, B., Oberst, J., Jaumann, R., und Neukum, G. (2005). Mars Express HRSC Data Processing - Methods and Operational Aspects. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(10):1143–1152. 33

Scholten, F., Gwinner, K., und Wewel, F. (2002). Angewandte digitale Photogrammetrie mit der HRSC. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Seiten 317–332. 25

Smith, D., Neumann, G., Arvidson, R. E., Guinness, E. A., und Slavney, S. (2003). Mars Global Surveyor laser altimeter mission experiment gridded data record. *NASA Planetary Data System*. 20

Smith, D. E., Zuber, M. T., Frey, H. V., Garvin, J. B., Head, J. W., Muhleman, D. O., Pettengill, G. H., Phillips, R. J., Solomon, S. C., Zwally, H. J., Banerdt, W. B., Duxbury, T. C., Golombek, M. P., Lemoine, F. G., Neumann, G. a., Rowlands, und Weitere (2001). Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10):23689–23722. 20

Spiegel, M. (2007). *Kombinierte Ausgleichung der Mars Express HRSC Zeilenbilddaten und des Mars Global Surveyor MOLA DGM*. Dissertation, DGK-C, Nr. 610, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag C. H. Beck, München. 12, 16, 17, 18, 24, 30, 31, 35, 40, 51, 59, 60

Strunz, G. (1993). *Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen*. Dissertation, DGK-C, Nr. 408, Deutsche Geodätische Kommission. 18

Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., und Fitzgibbon, A. (2000). Bundle adjustment - a modern synthesis. *Vision Algorithms: Theory and Practice*, Seiten 298–372. 15

Weser, T., Rottensteiner, F., Willneff, J., Poon, J., und Fraser, C. S. (2008). Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. *The Photogrammetric Record*, 23(123):255–274. 18

Wu, B., Hu, H., und Guo, J. (2014). Integration of Chang'E-2 imagery and LRO laser altimeter data with a combined block adjustment for precision lunar topographic modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 391:1–15. 18

Zeitler, W. (1999). *Simultane Neuausgleichung des globalen 3D-Mars-Netzes*. Dissertation, DGK-C, Nr. 511, Deutsche Geodätische Kommission. 20

Zender, J. F., Delhaise, F., und Arviset (2009). Spacecraft and Payload Data Handling. *Mars Express: The Scientific Investigations*, (SP-1291):249–256. 25

A. Anhang

- Abbildung A.1: Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15
- Abbildung A.2: Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23
- Abbildung A.3: Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15
- Abbildung A.4: Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23
- Abbildung A.5: HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15
- Abbildung A.6: HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23
- Abbildung A.7: HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15
- Abbildung A.8: HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23
- Abbildung A.9: Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15
- Abbildung A.10: Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23
- Abbildung A.11: Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15
- Abbildung A.12: Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23

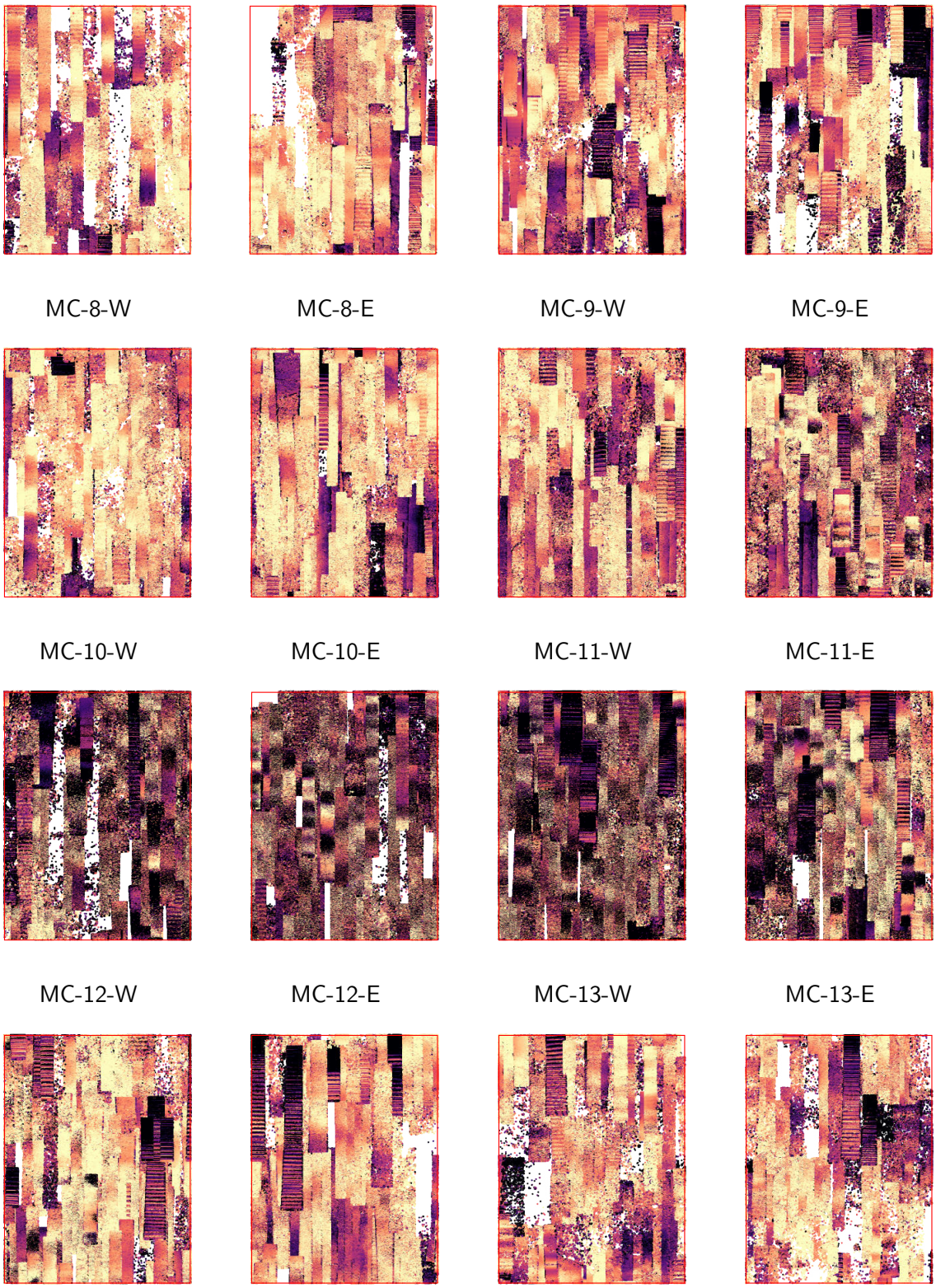


Abbildung A.1. Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15

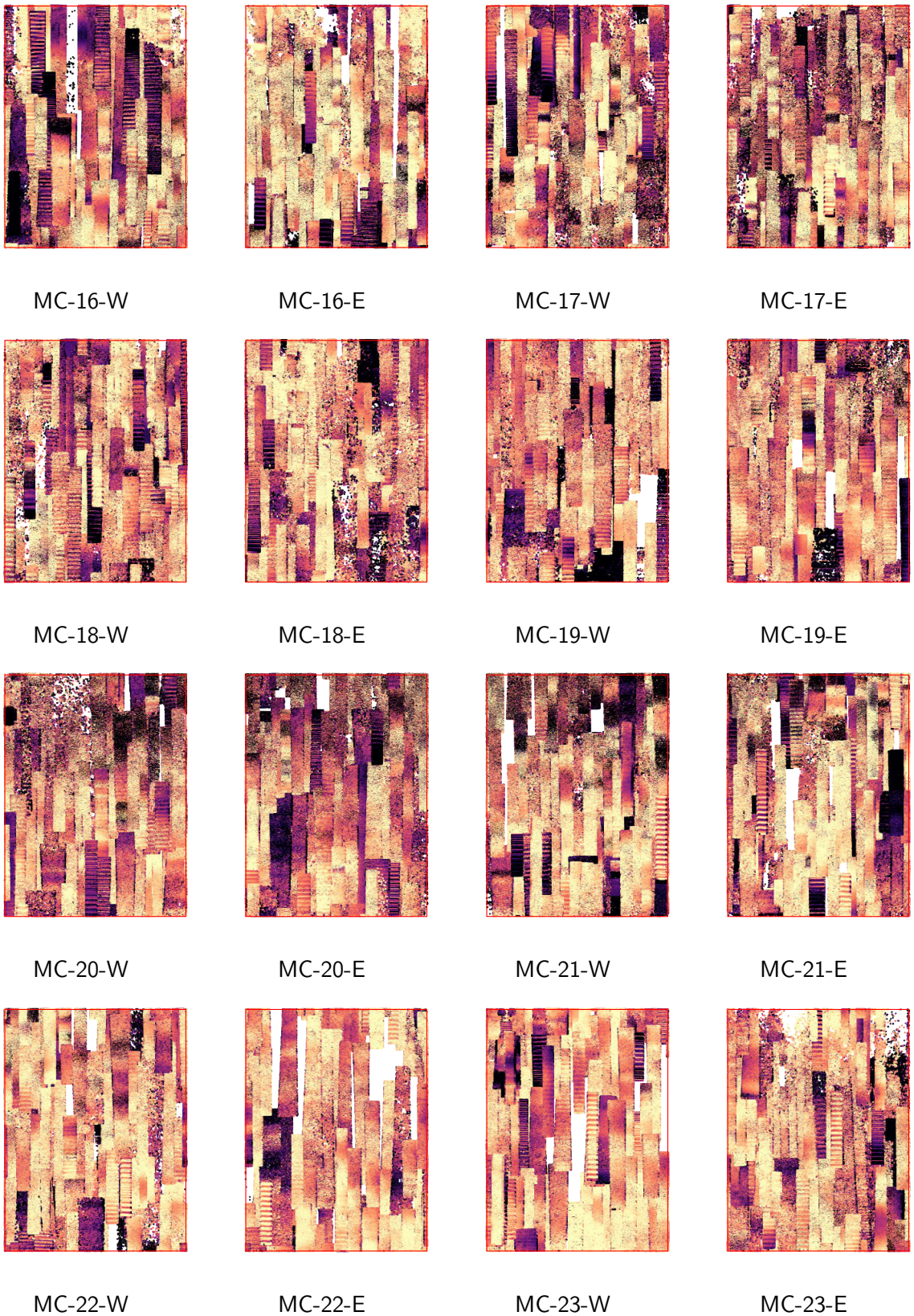


Abbildung A.2. Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23

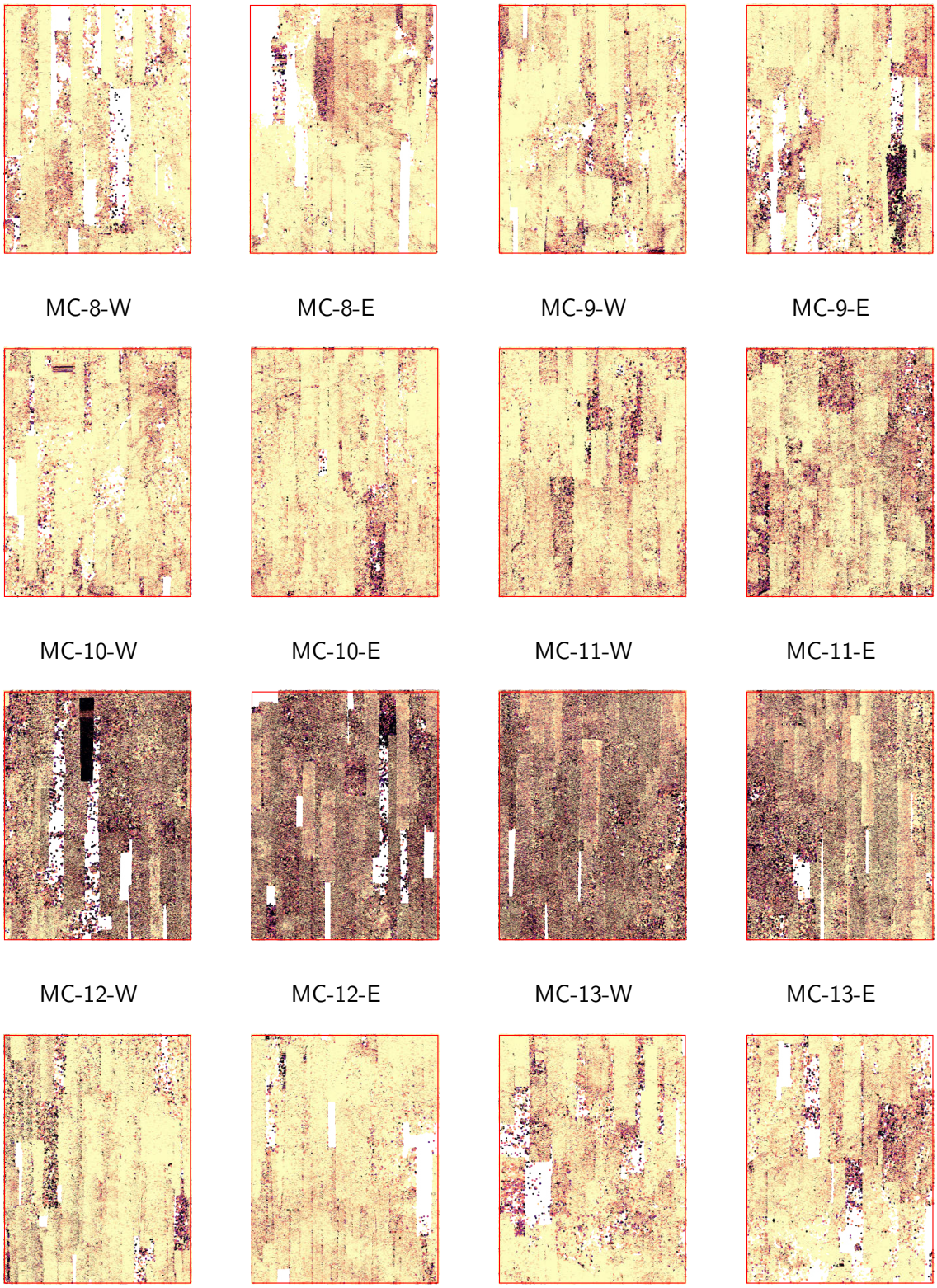


Abbildung A.3. Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15

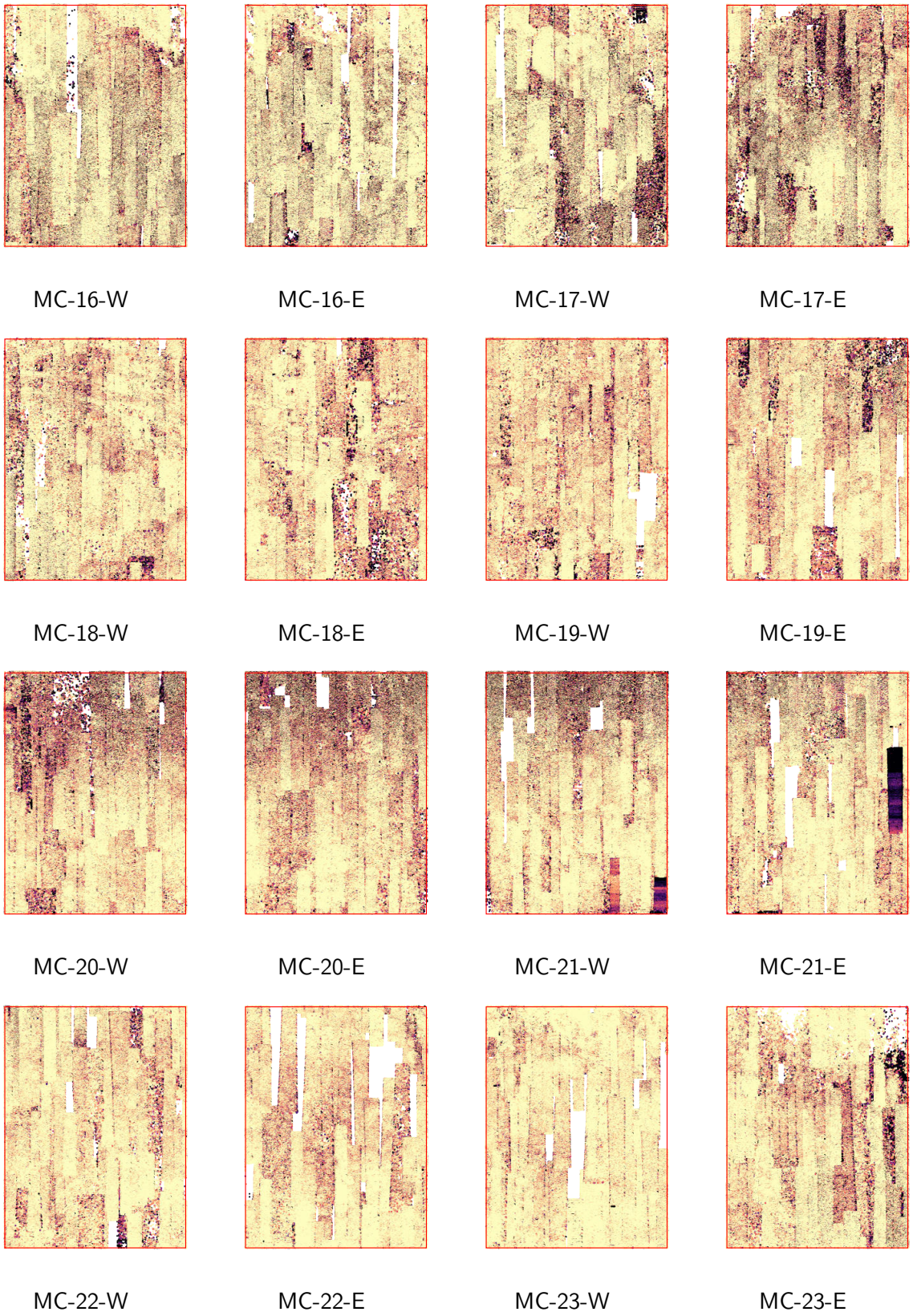


Abbildung A.4. Vorwärtsschnittfehler aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23

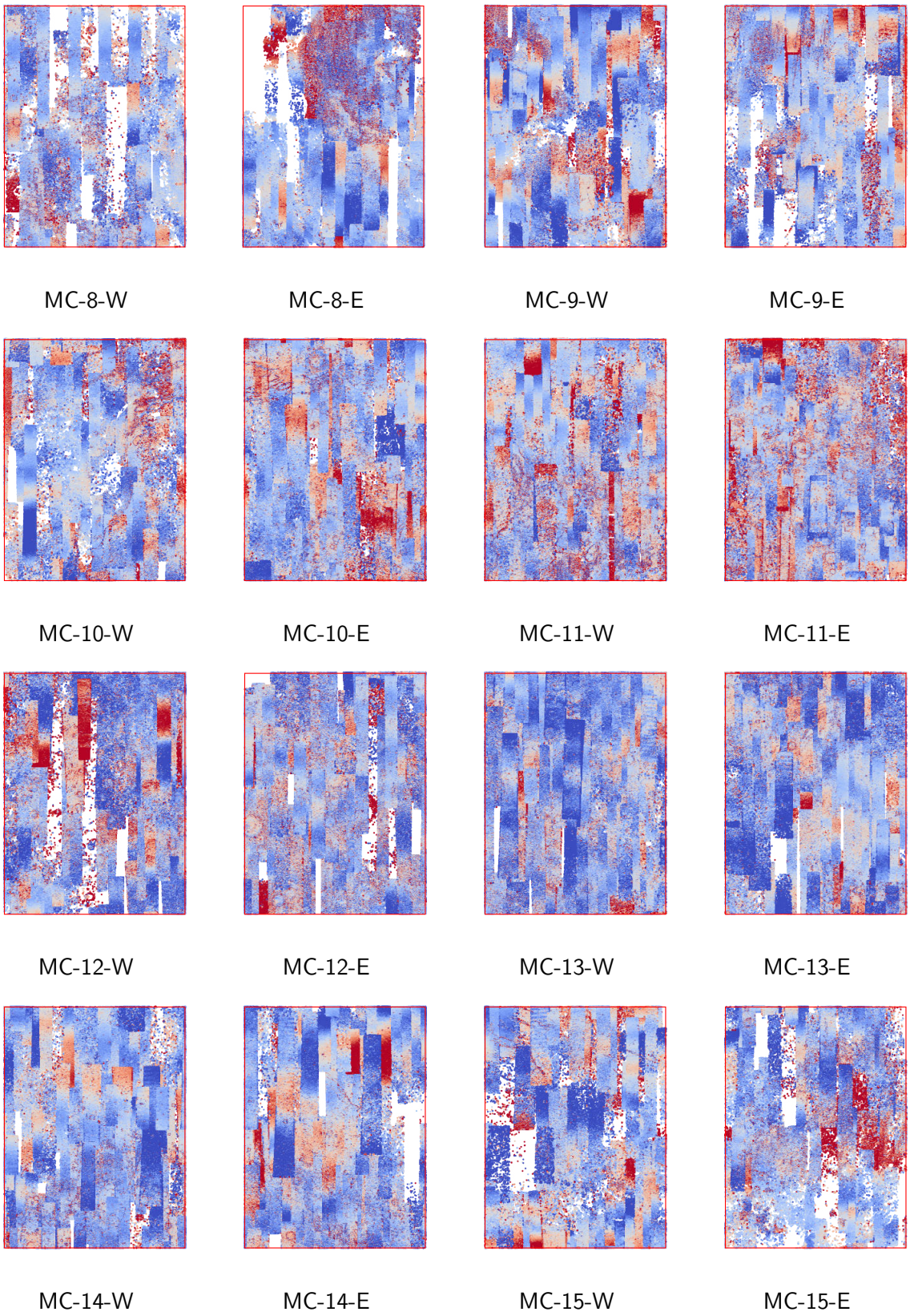


Abbildung A.5. HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15

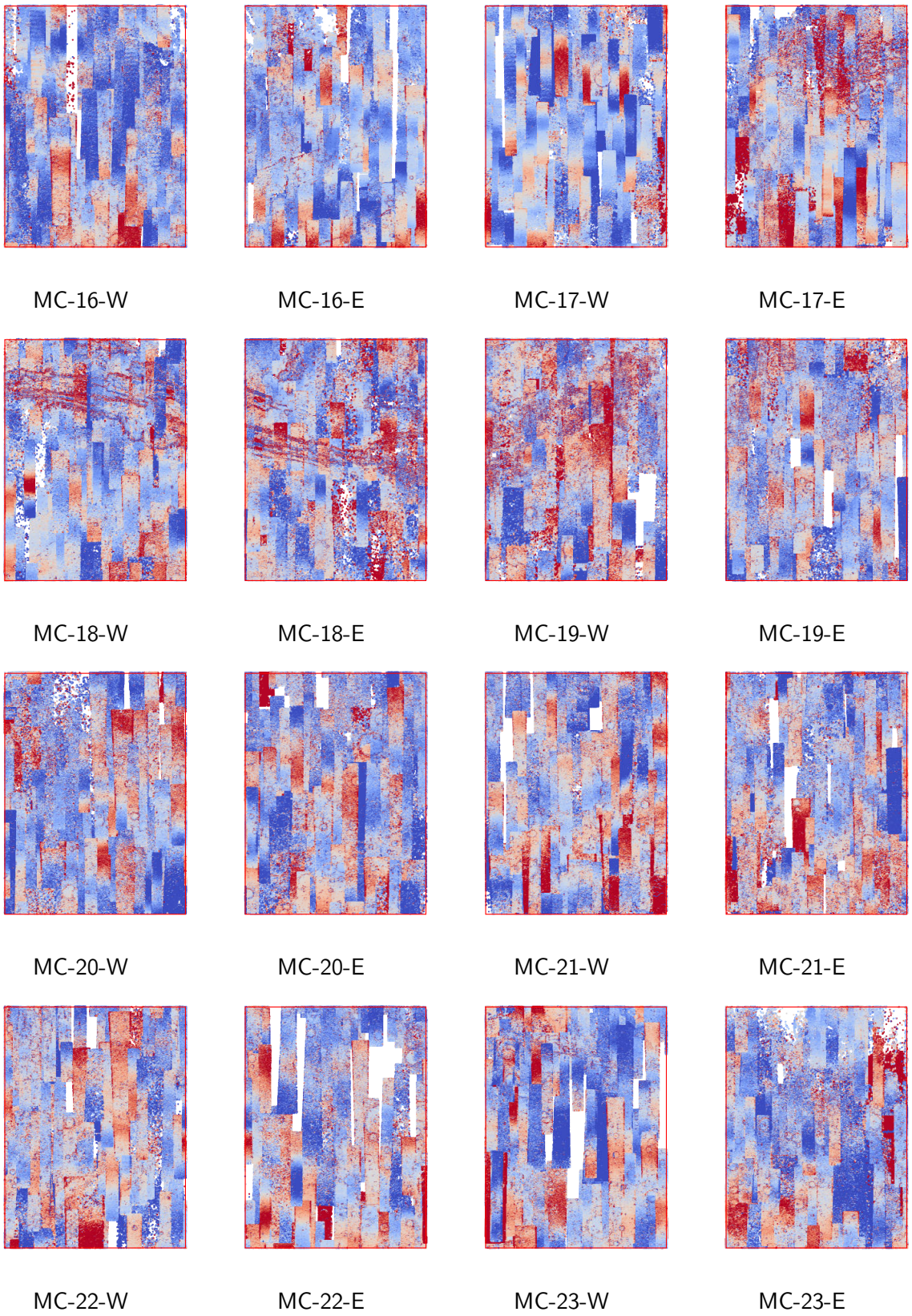


Abbildung A.6. HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23

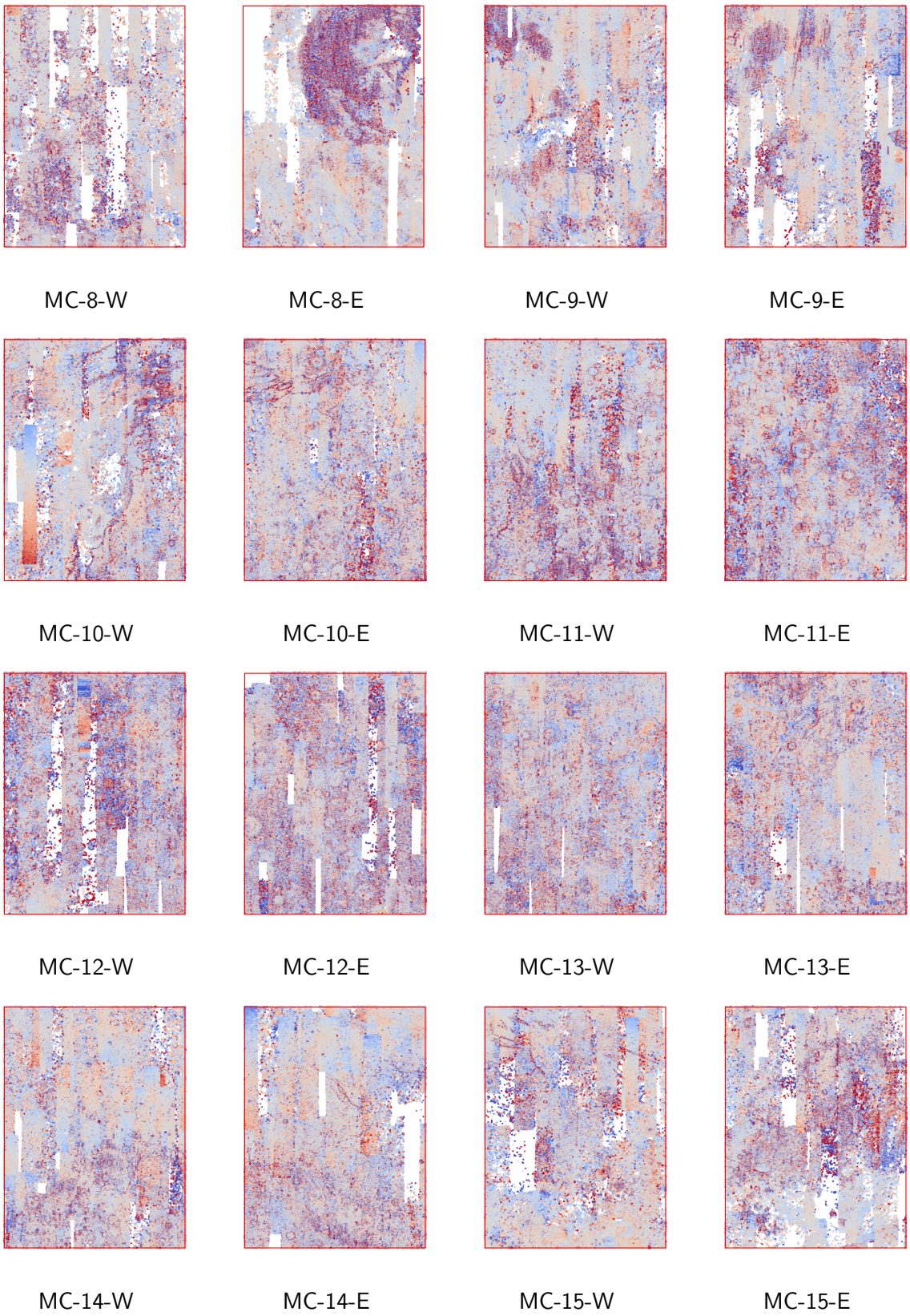
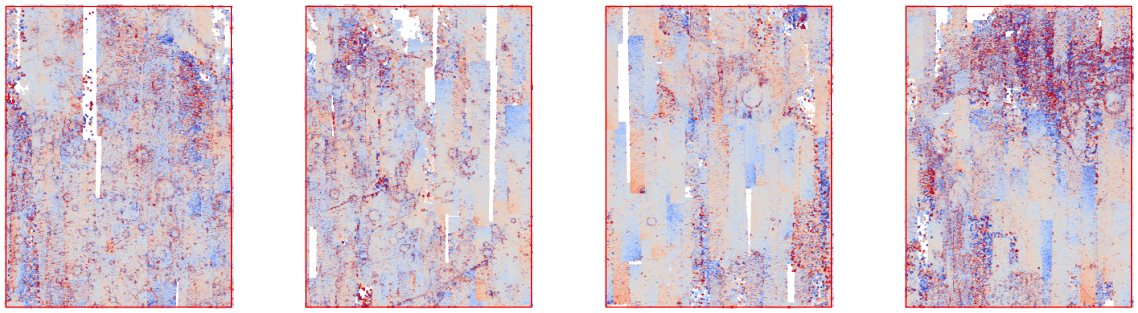
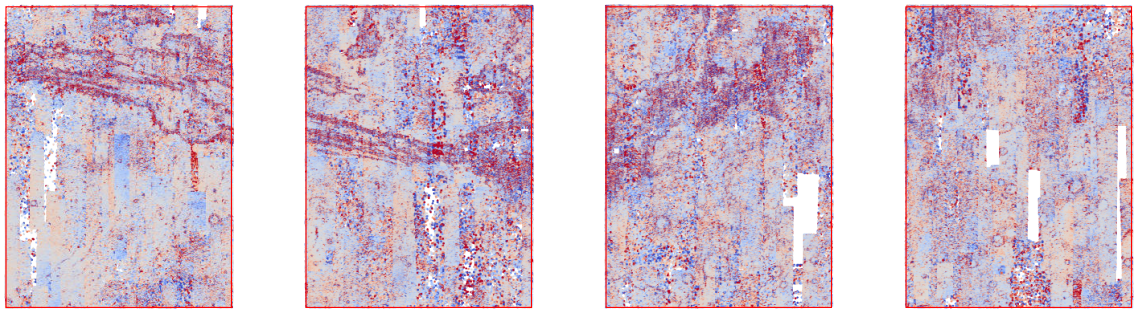


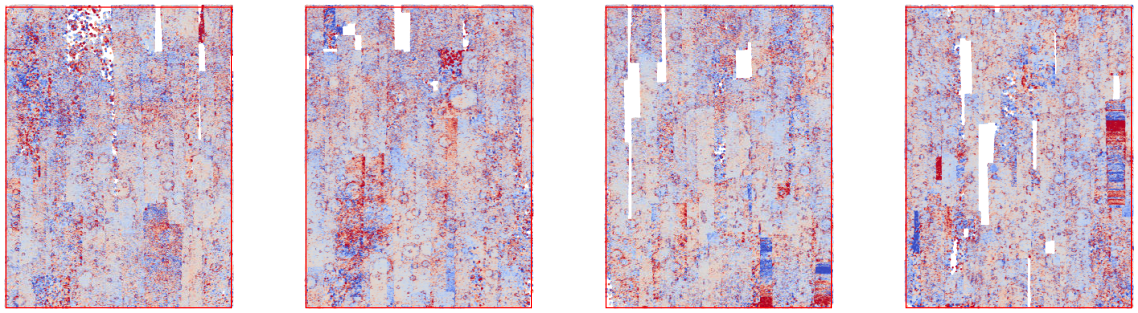
Abbildung A.7. HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15



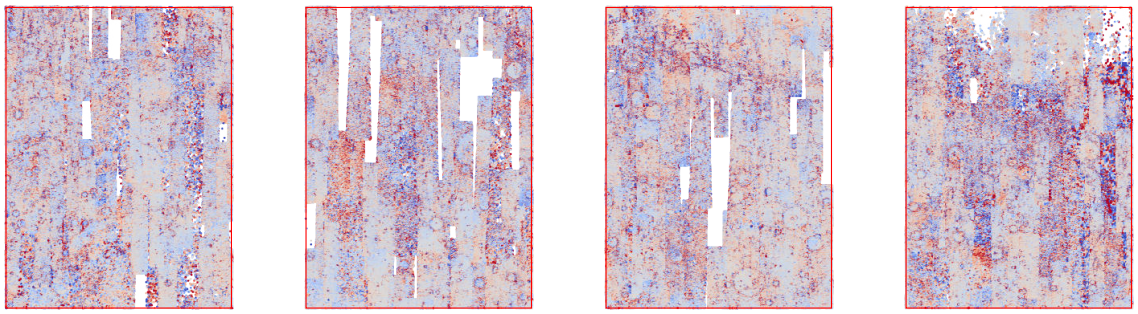
MC-16-W MC-16-E MC-17-W MC-17-E



MC-18-W MC-18-E MC-19-W MC-19-E



MC-20-W MC-20-E MC-21-W MC-21-E



MC-22-W MC-22-E MC-23-W MC-23-E

Abbildung A.8. HRSC-MOLA-Höhendifferenz aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15

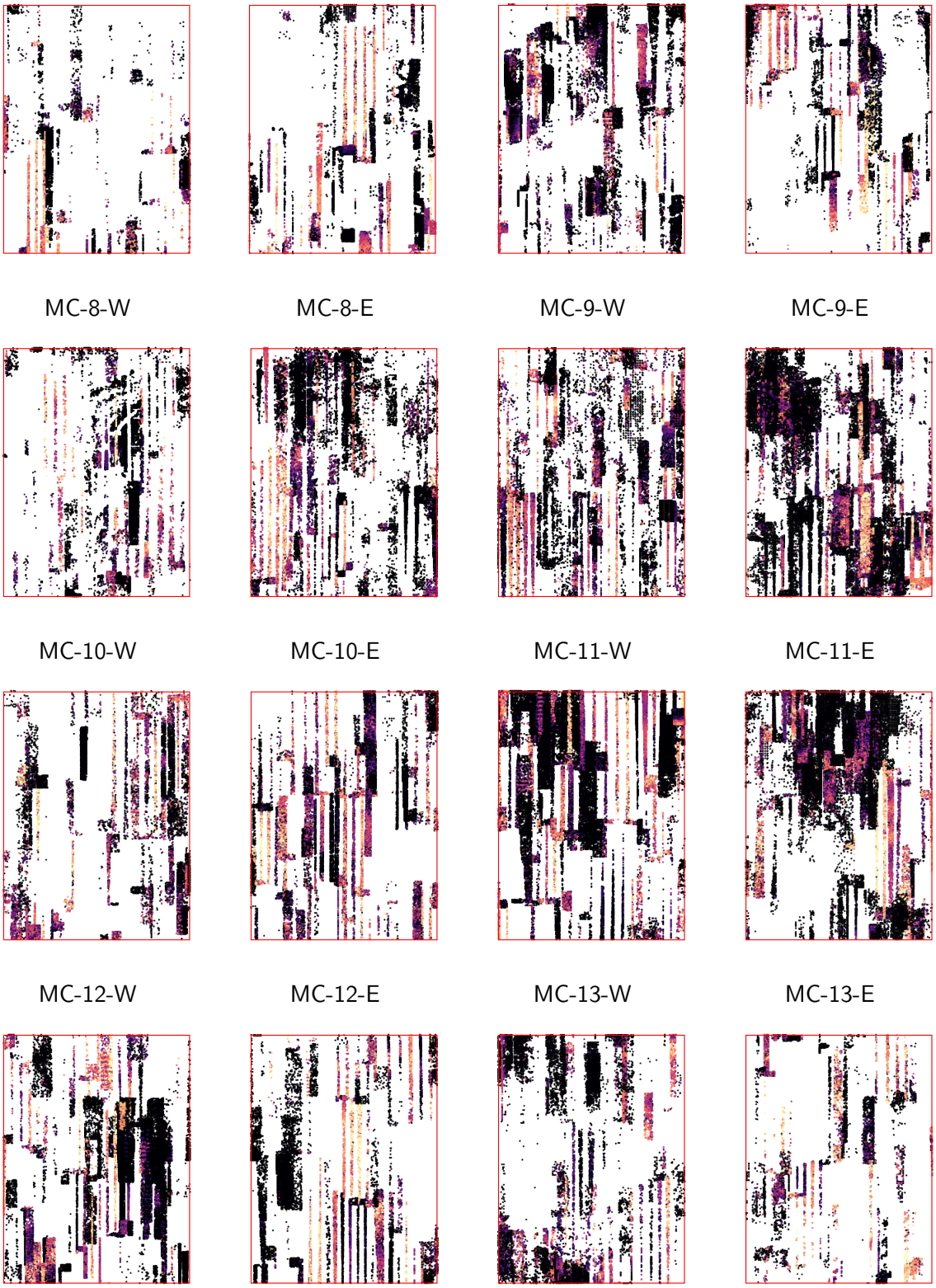
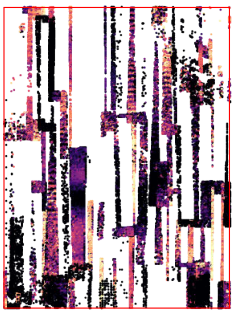
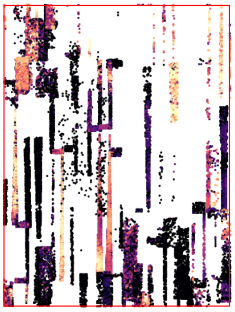
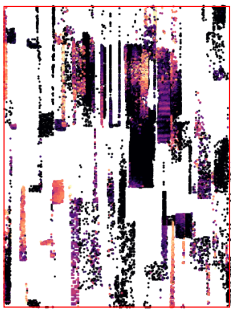
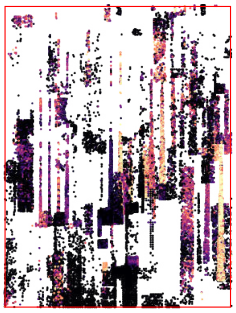


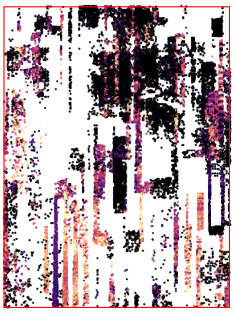
Abbildung A.9. Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15


MC-16-W


MC-16-E

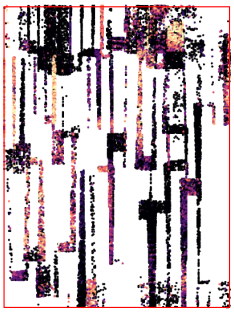

MC-17-W

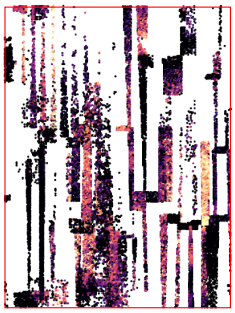

MC-17-E

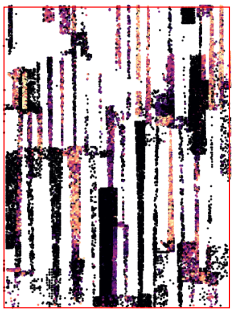

MC-18-W

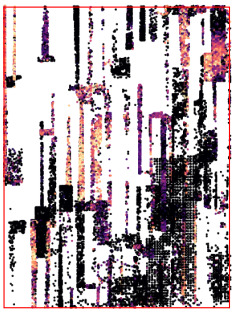

MC-18-E

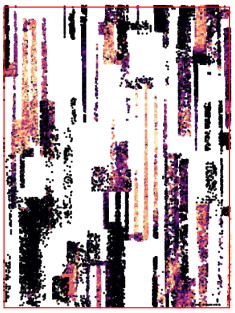

MC-19-W

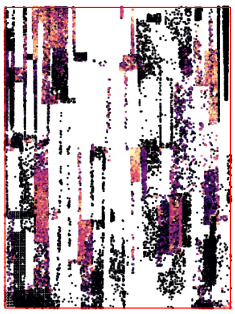

MC-19-E

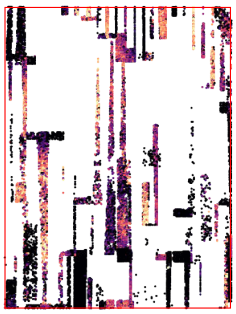

MC-20-W


MC-20-E


MC-21-W


MC-21-E


MC-22-W


MC-22-E


MC-23-W

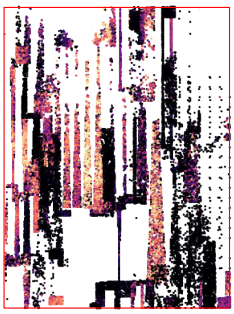

MC-23-E

Abbildung A.10. Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den nominellen Orientierungsdaten für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23

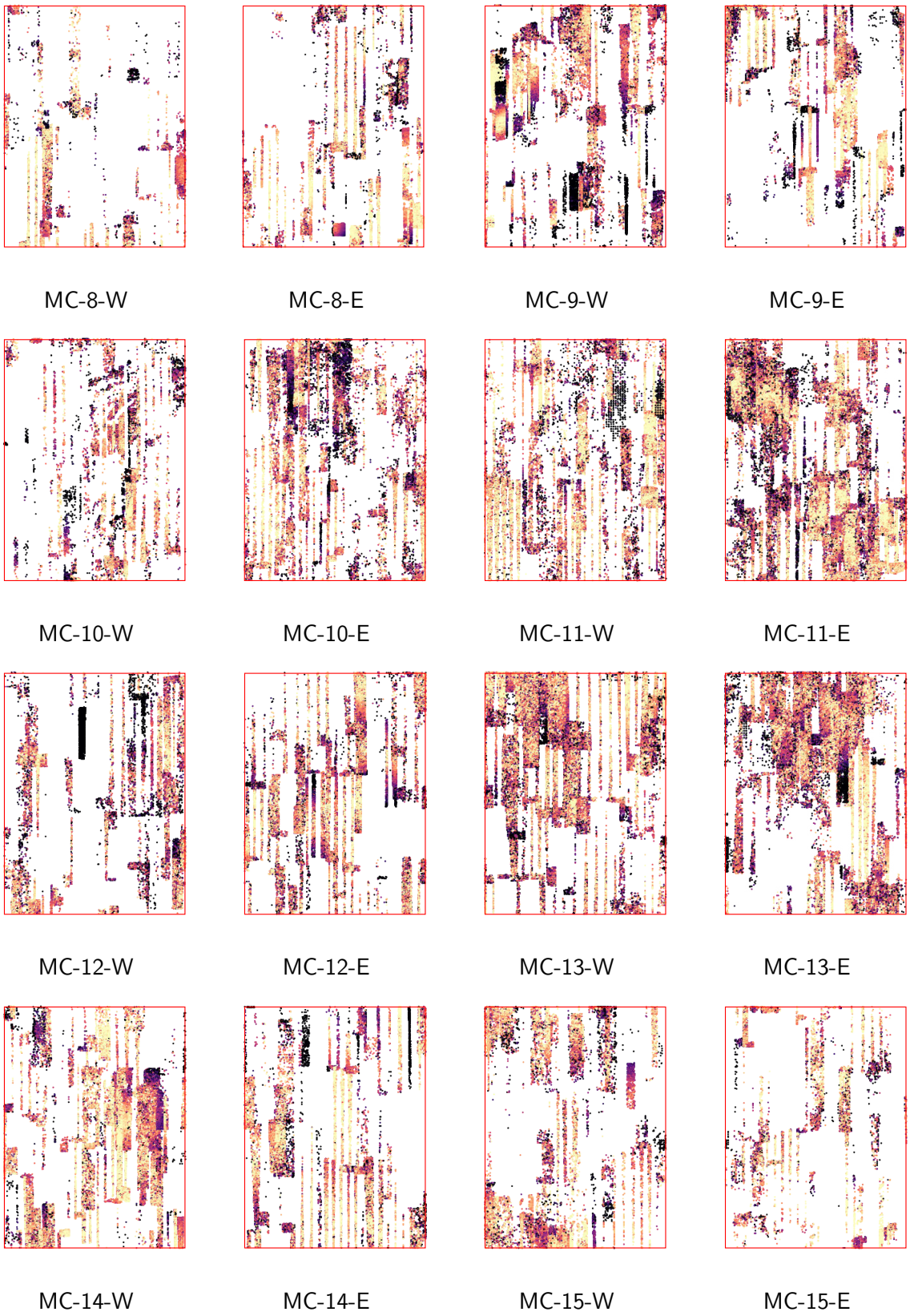
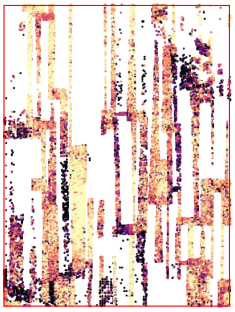
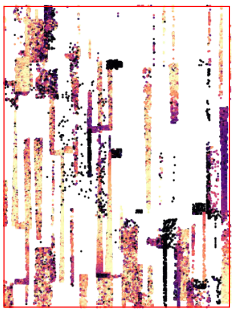


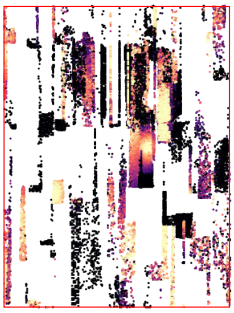
Abbildung A.11. Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-8 bis MC-15



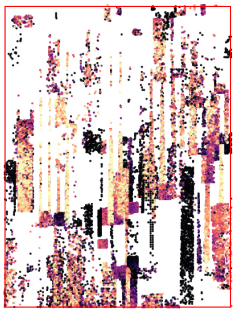
MC-16-W



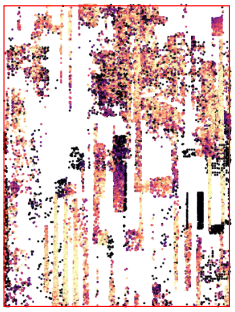
MC-16-E



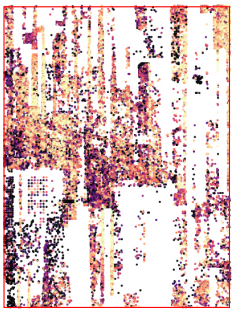
MC-17-W



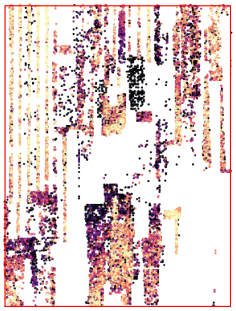
MC-17-E



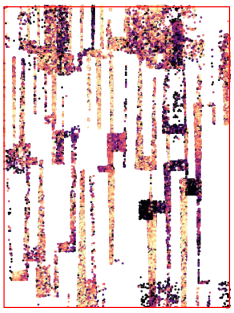
MC-18-W



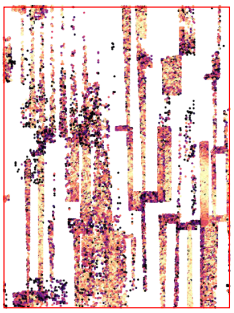
MC-18-E



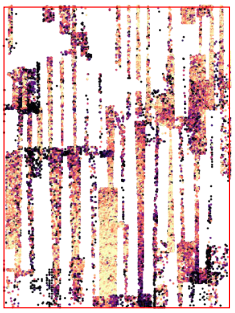
MC-19-W



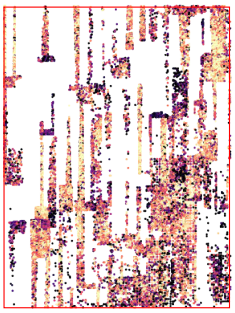
MC-19-E



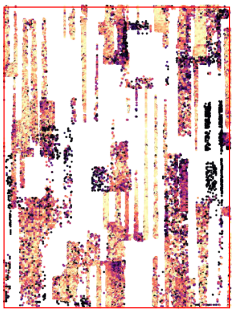
MC-20-W



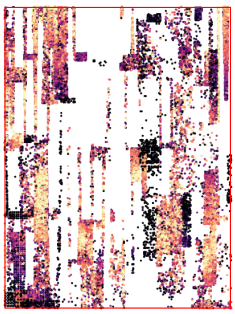
MC-20-E



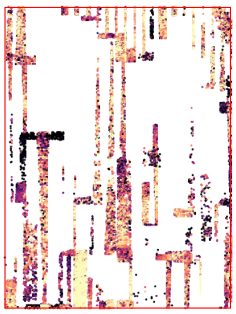
MC-21-W



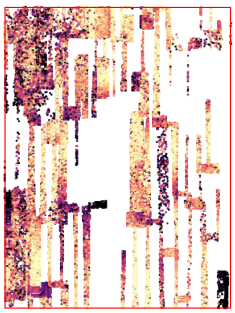
MC-21-E



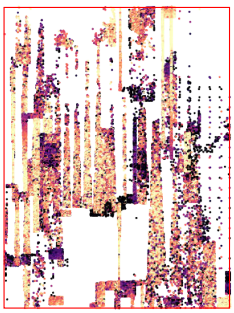
MC-22-W



MC-22-E



MC-23-W



MC-23-E

Abbildung A.12. Punktdifferenzen aus der Evaluierung der HRSC-Objektpunkte mit den Orientierungsdaten nach der Blockausgleichung für die Halbkacheln MC-16 bis MC-23

Lebenslauf

Jonas Bostelmann, geboren am 21. September 1982 in Hannover

seit 09/2019	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) - Landesvermessung und Geobasisinformation - Landesbetrieb *Fachexperte Fernerkundung*
06/2009 - 08/2019	Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover *Wissenschaftlicher Mitarbeiter*
10/2004 - 04/2009	Leibniz Universität Hannover *Studium der Geodäsie und Geoinformatik*
06/2003 - 03/2004	Kinderkrankenhaus auf der Bult *Zivildienst*
08/1989 - 07/2002	Freie Waldorfschule Hannover-Maschsee *Allgemeine Hochschulreife*