



Maria Krüger, BSc

**Radargrammetrische Auswertung
hochauflösender SAR-Daten
zur Gewinnung digitaler Oberflächenmodelle**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Forstwirt Mathias Schardt

Institut für Geodäsie

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Die Radargrammetrie ist seit mehreren Dekaden ein etabliertes Verfahren zur Ableitung von geometrischen Parametern aus *Synthetic Aperture Radar*-Bildern (SAR) zur Generierung digitaler Oberflächenmodelle. Dabei stellt die Korrespondenzanalyse den wichtigsten sowie aufgrund der typischen geometrischen und radiometrischen Eigenschaften von SAR-Aufnahmen zugleich den kritischsten Arbeitsschritt dar. Der Erfolg der Korrespondenzanalyse ist abhängig von der Ähnlichkeit der Bilder und verantwortlich für die Genauigkeit des abgeleiteten Oberflächenmodells. In dieser Arbeit werden zwei Methoden untersucht, die die Bilder mittels einer Art Skalierung einander ähnlicher machen, um speziell die geometrischen Verzerrungen zu kompensieren. Die beiden Ansätze werden an Stripmap sowie Staring SpotLight Daten von TerraSAR-X zweier österreichischer Testgebiete untersucht. Die Satellitenmission TerraSAR-X liefert seit seinem Start 2007 hochauflösende SAR-Bilder in verschiedenen Aufnahmemodi und unterschiedlichen Einfallswinkeln, was die Voraussetzung für die radargrammetrische Auswertung ist. Die verwendeten Daten besitzen eine Auflösung von 3 bzw. 0,24 Meter und liegen unter drei verschiedenen Aufnahmewinkeln sowie vom aufsteigenden und absteigenden Orbit vor. Die generierten Oberflächenmodelle werden mit aus LiDAR-Daten abgeleiteten Referenzmodellen evaluiert.

Abstract

Radargrammetry is a well-known and established method for several decades to derive geometric parameters based on *Synthetic Aperture Radar* (SAR) images and to generate digital surface models. Hereby the image matching step is the most important and as well the most critical work step due to the typical geometric and radiometric nature of SAR images. The success of the correspondence analysis depends on the similarity of the images and is responsible for the accuracy of the derived surface model. In this thesis two different methods have been analyzed to adjust the images by employing different types of scaling to compensate the geometric distortion. Both approaches have been tested at two different Austrian test sites on the basis of Stripmap and Staring SpotLight data of TerraSAR-X. The data used have a resolution of 3 and 0.24 meters, respectively and were gathered from three different angles of incidence as well as from ascending and descending orbit. The generated surface models are evaluated with LiDAR reference data.

Danksagung

Diese Masterarbeit wurde am Institut für Geodäsie an der Technischen Universität Graz in Zusammenarbeit mit Joanneum Research Digital im Rahmen des Vision+ Projektes angefertigt.

Zunächst bedanke ich mich herzlich bei Herrn Professor Schardt für die Betreuung dieser Arbeit und seine immer wieder aufbauenden Worte. Karlheinz Gutjahr und Johann Raggam danke ich für die fachliche Unterstützung und dafür, dass die bei RSG jedes Element und jeden Käfer mit Vornamen kennen. Mein größter Dank gebührt Roland Perko für seine umfangreiche Betreuung, richtungsweisenden Ratschläge und seine motivierende, positive Art. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht das geworden, was sie jetzt ist. Dem Forschungsinstitut Joanneum Research Digital danke ich für die Möglichkeit der Mitarbeit im Projekt Vision+ und für die Finanzierung dieser Arbeit. Zuletzt, aber von ganzem Herzen, möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken. Für alles.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Problemstellung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	Prinzip des Radars	5
2.1.1	SLAR: Seitensichtradar mit realer Apertur	5
2.1.2	SAR: Radar mit synthetischer Apertur	7
2.1.2.1	Eigenschaften der SAR-Bilder	8
2.1.2.2	Satellitenorbits	9
2.1.2.3	Aufnahmemodi von TerraSAR-X	10
2.2	Radargrammetrie	11
2.2.1	Korrespondenzanalyse	12
2.2.1.1	Ähnlichkeitsbedingungen	13
2.2.1.2	Flächenbasierte Verfahren	15
2.2.1.3	Ähnlichkeitsmaße	15
2.2.1.4	Semiglobale Optimierung	17
2.2.1.5	Hierarchischer Lösungsansatz mit Auflösungspyramide	18
2.2.1.6	Filterung	19
2.2.2	Radargrammetrische Oberflächenrekonstruktion	19
3	State of the Art	22
4	Methodik	24
4.1	Untersuchungsgebiete und Datensätze	24
4.1.1	Untersuchungsgebiete	25
4.1.2	Verwendete Datensätze	25
4.1.3	Referenzdaten	26
4.1.4	Simulierte Daten	27
4.2	Adaption des Referenzfensters	29
4.3	DHM-basierte Registrierung	36
5	Ergebnisse und Diskussion	38

5.1	Adaption des Referenzfensters	38
5.1.1	Diskussion	44
5.2	DHM-basierte Registrierung	51
5.2.1	Burgau	52
5.2.2	Ötztal	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	71
6.1	Ansatz 1: Skalierung des Referenzfensters	72
6.2	Ansatz 2: DHM-basierte Registrierung	72
A	Anhang	A-1
A.1	Begriffserklärungen	A-1
A.2	Ergebnisse vom Ansatz <i>Adaption des Referenzfensters</i> mit Schwellwerten . .	A-3
A.3	Hangneigungsabhängige Genauigkeiten	A-5
	Literaturverzeichnis	vii

Abbildungsverzeichnis

1.1	TerraSAR-X-Aufnahme unter unterschiedlichen Betrachtungswinkeln.	2
1.2	Unterschiedlich starke Stauchung und Streckung eines Berghanges.	4
2.1	Schematische Darstellung eines SLAR.	6
2.2	SAR-Aufnahmeprinzip	7
2.3	Geometrische Verzerrungserscheinungen in den SAR-Bildern	9
2.4	Prinzip der Aufnahmemodi bei TerraSAR-X.	10
2.5	Eine mögliche stereoskopische Radarkonfiguration.	11
2.6	Darstellung der Epipolarbedingung.	13
2.7	Pixelbasierte Korrespondenzanalyse.	15
2.8	Censustransformation.	16
2.9	SGM: 16 Pfade zur Berechnung der kumulierten Kosten.	17
2.10	Auflösungspyramide.	18
2.11	Radargrammetrische Verarbeitungskette nach Gutjahr et al. (2014).	20
4.1	Detailansicht des LiDAR-Modells von Burgau.	27
4.2	Artefakte in den synthetischen SAR-Bildern.	28
4.3	Kombination von Korrelationsprofilen.	30
4.4	Methodik der Kombination von Korrelationsprofilen.	31
4.5	Beispiel der Skalierungsmethode bei Vergrößerung des Referenzfensters. . . .	31
4.6	Korrelationsprofile für mehrere Skalierungsfaktoren k	32
4.7	Kombination von Methode 1 und 2.	33
4.8	Korrelationsprofile mehrerer k und additive Kombination der DSI.	34
4.9	Korrelationsprofile mehrerer k und gewichtet additive Kombination der DSI. .	34
4.10	Korrelationsprofile mehrerer k und multiplikative Kombination der DSI. . .	35
4.11	Verschiedene Projektionsebenen bei der Epipolarrektifizierung.	36
4.12	Vergleich der Epipolarrektifizierungsmethoden.	37
5.1	Referenz- und Suchbild vom Ötztal.	38
5.2	Referenz- und Suchbildausschnitt von Ötztal.	39
5.3	Disparitäten der Standardmethode.	41
5.4	Disparitäten der Methode 1.	41
5.5	Disparitäten der Methode 2.	42
5.6	Disparitäten der Methode 3.	43

5.7	Skalierungsfaktor der Methode 2.	45
5.8	Mit unterschiedlichen Faktoren skalierte Referenzfenster.	46
5.9	Disparitäten der Berechnung mit k_{true} mit festen Referenzfenstergrößen. . .	47
5.10	Disparitäten der Berechnung mit k_{true} und Kombination der Profile.	47
5.11	Disparitäten der Berechnung mit k_{true} mit festen FG mit Schwellwerten. . .	48
5.12	Disparitäten der Berechnung mit k_{true} und Kombination der Profile mit Schwellwerten.	48
5.13	DOM von Burgau aus Stereobildern des aufsteigenden Orbits.	53
5.14	DOM von Burgau aus den Stereobildern 2-3 des auf- und absteigenden Orbits. .	53
5.15	DOM von Burgau aus den Bildtripletts des auf- und absteigenden Orbits. . .	53
5.16	Fusioniertes DOM von Burgau aus den Bildtripletts beider Orbits.	53
5.17	Farbkodiertes Höhendifferenzmodell Burgau (konventionelle Methode).	55
5.18	Farbkodiertes Höhendifferenzmodell Burgau (DHM-basierte Registrierung). . .	55
5.19	Orthophoto Burgau.	56
5.20	Histogramme der Höhendifferenzen von Burgau.	56
5.21	Anwendung einer Layover-Schatten-Maske auf die Ötztalaten.	59
5.22	Perspektivische Ansicht des generierten Oberflächenmodells vom Ötztal. . .	60
5.23	DOM vom Ötztal aus Stereobildern des aufsteigenden Orbits.	61
5.24	DOM vom Ötztal aus den Stereobildern 2-3 des auf- und absteigenden Orbits. .	61
5.25	DOM vom Ötztal aus den Bildtripletts des auf- und absteigenden Orbits. . .	61
5.26	Fusioniertes DOM vom Ötztal aus den Bildtripletts beider Orbits.	61
5.27	Farbkodiertes Höhendifferenzmodell Ötztal (konventionelle Methode).	62
5.28	Farbkodiertes Höhendifferenzmodell Ötztal (DHM-basierte Registrierung). . .	62
5.29	Histogramm der Höhendifferenzen vom Ötztal.	63
5.30	Referenzoberflächenmodell vom Ötztal aus LiDAR-Daten.	63
5.31	Orthophoto vom Ötztal ohne und mit Waldmaske.	63
5.32	Abhängigkeit der räumlichen Abweichungen vom Stereoschnittwinkel.	65
5.33	Abschätzung der räumlichen Abweichungen.	66
5.34	Hangneigungsklassifizierung vom Ötztal.	68
5.35	Hangneigungabhängige Genauigkeitswerte vom Ötztal.	69
A.1	Abdeckung der SRTM-Daten.	A-2
A.2	Disparitäten der Standardmethode mit Schwellwert.	A-3
A.3	Disparitäten der Methode 1 mit Schwellwert.	A-3
A.4	Disparitäten der Methode 2 mit Schwellwert.	A-4
A.5	Disparitäten der Methode 3 mit Schwellwert.	A-4
A.6	Hangneigungabhängige Genauigkeitswerte von ASC-Stereos.	A-5
A.7	Hangneigungabhängige Genauigkeitswerte von DSC-Stereos.	A-6
A.8	Hangneigungabhängige Genauigkeitswerte von ASC-DSC-Stereos.	A-7
A.9	Hangneigungabhängige Genauigkeitswerte der Tripletts.	A-8

Tabellenverzeichnis

2.1	Parameter der Aufnahmemodi von TerraSAR-X	10
4.1	Metadaten der Testdaten zu Burgau und Ötztal.	26
5.1	Statistik der Ergebnisse aus dem Ansatz 1 ohne Schwellwerte.	40
5.2	Statistik der Ergebnisse aus dem Ansatz 1 mit Schwellwerten.	43
5.3	Statistik der Ergebnisse aus dem Ansatz 1 mit „wahrer“ Skalierung k_{true} . . .	49
5.4	Parameter der Prozessierung.	51
5.5	Resultierende Auflösungen des Multilooking.	52
5.6	Statistik der Ergebnisse für Burgau.	57
5.7	Statistik der Ergebnisse für Ötztal.	64
A.1	Metadaten SRTM und Genauigkeiten der DHM.	A-2

1 Einleitung

Die Radargrammetrie ist seit mehreren Dekaden ein etabliertes Verfahren zur Ableitung von geometrischen Parametern aus Radarbildern und zur Generierung digitaler Oberflächenmodelle. Mithilfe der Radartechnik werden seit Mitte des 20. Jahrhunderts Informationen über Objekte auf der Erdoberfläche erhoben. Der Vorteile gegenüber optischen Systemen ist die Wetter- und Tageszeitunabhängigkeit bei der Datenaufnahme. Allerdings ist bei diesem Radarverfahren mit realer Apertur (RAR) die Auflösung in Flugrichtung (Azimutauflösung) abhängig von der Flughöhe, weshalb die RAR-Systeme für große Flughöhen ungeeignet sind. Seit 1951 ermöglicht das von Carl Wiley entwickelte SAR-Verfahren (*Synthetic Aperture Radar*) Radaraufnahmen aus sehr hohen Flughöhen, wie bei Satelliten, da hier die Azimutauflösung unabhängig von der Flughöhe ist.

Es existieren zwei generelle Verfahren zur Generierung digitaler Oberflächenmodelle aus Radardaten: Die Radarinterferrometrie und die Radargrammetrie. Beide benötigen mindestens zwei Aufnahmen des gleichen Gebietes der Erdoberfläche von unterschiedlichen Sensorpositionen. Bei der Radarinterferrometrie wird der Phasenunterschied der Signale beider Bilder ausgewertet, wozu kohärente Strahlung erforderlich ist. Des Weiteren muss die Datenaufnahme beider Bilder zeit- und ortsnahe erfolgen, da mit zunehmenden zeitlichen Abstand der Akquisition die Wahrscheinlichkeit der Kohärenz sinkt, die für die Koregistrierung der beiden Bilder erforderlich ist.

Bei der Radargrammetrie hingegen werden die Amplitudenwerte des reflektierten Signals verwendet, so dass weder kohärente Strahlung noch eine geringe zeitliche Auflösung nötig ist. In diesen unterschiedlichen Bildern werden die Abbildungen des gleichen Geländepunktes gesucht und in Verbindung gebracht. Aus dem relativen Abstand zwischen diesen korrespondierenden Punkten, der sogenannten Disparität, wird anschließend die Höhe des Geländepunktes abgeleitet. Dieses Suchverfahren wird Korrespondenzanalyse genannt, die aufgrund der typischen geometrischen und radiometrischen Eigenschaften von SAR-Aufnahmen ein kritischer Arbeitsschritt ist. Der Erfolg der Korrespondenzanalyse ist abhängig von der Ähnlichkeit der Bilder und verantwortlich für die Genauigkeit des abgeleiteten Oberflächenmodells. In dieser Arbeit werden daher Methoden untersucht, die auf die geometrischen Verzerrungen innerhalb der SAR-Bilder eingehen, um die Bilder einander ähnlicher zu machen.

1.1 Motivation

Radargrammetrie war die erste angewandte Methode zur Ableitung geometrischer Informationen aus Flugzeugradardaten. Ende der 1970er bis Ende der 1980er wurde die Radargrammetrie erfolgreich an Radardaten der ersten zivilen Satellitenmissionen mit synthetischer Apertur SEASAT (1978), SIR-A (1981) und SIR-B (1984) erprobt (Leberl et al., 1986; Leberl, 1990). Aufgrund der geringen Genauigkeit ist die Methodik in den neunziger Jahren in den Schatten der Radarinterferometrie getreten. Erst mit der Verfügbarkeit hochauflösender SAR-Daten ab 2007 durch die Sensoren TerraSAR-X (Deutschland), RADARSAT-2 (Kanada) und COSMO-SkyMed (Italien) eröffnete sich neues Potential für die Satellitenradargrammetrie (Schwäbisch et al., 2009).

Die Genauigkeit sowie die geometrische Auflösung der radargrammetrisch generierten Oberflächenmodelle sind primär von der Bodenpunktauflösung der verwendeten Radardaten abhängig. Des Weiteren benötigt die Radargrammetrie Daten, die unter verschiedenen Beobachtungswinkeln aufgenommen wurden. Dies wurde bis zum Start der neuen Generation der hochauflösenden SAR-Sensoren 2007 von vielen Satelliten nicht unterstützt. Die deutsche TerraSAR-X-Mission bietet Satelliten SAR-Bilder in unterschiedlichen Aufnahmemodi an. Demnach liefert der Stripmap und der Staring SpotLight Modus Bilder mit einer Auflösung von 3 bzw. 0,24 Metern in Azimutrichtung.

Darüber hinaus ermöglicht der steuerbare Radarstrahl Aufnahmen mit verschiedenen Einfallswinkeln, so dass ein bestimmtes Gebiet mit unterschiedlichen Aufnahmewinkeln zwischen 20° bis 45° in beiden Modi erfasst werden kann (Abbildung 1.1). Zusammen mit diesen Bilddaten werden sehr genaue Metadaten (u.a. Flugbahninformationen) geliefert. Die Genauigkeit des sogenannten *Science Orbit* liegt im Bereich von wenigen Zentimetern, wodurch eine präzise Sensormodellierung und eine genaue dreidimensionale Punktberechnung möglich sind. Die Geolokalisierungsgenauigkeit der Staring SpotLight Bilder beträgt weniger als 1 Meter (Gutjahr et al., 2015). Diese Rahmenbedingungen motivieren zur Verwendung von TerraSAR-X-Daten für die radargrammetrische Generierung von digitalen Oberflächenmodellen mit hoher geometrischer Auflösung.

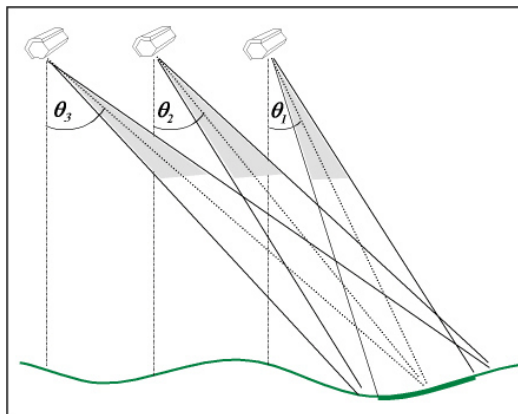


Abb. 1.1: TerraSAR-X-Aufnahme unter unterschiedlichen Betrachtungswinkeln (Raggam et al., 2009).

1.2 Problemstellung

Bei der Generierung von digitalen Oberflächenmodellen durch Radargrammetrie ist die Suche nach korrespondierenden Punkten in den Bildpaaren der wichtigste und aufgrund der radarspezifischen Eigenschaften der Radarbilder zugleich der problematischste Arbeitsschritt. Das Rauschverhalten (Speckle) und die geometrischen Verzerrungen erschweren die Zuordnung korrespondierender Punkte. Überlagerungseffekte und Abschattungen machen eine Korrespondenzbildung nahezu unmöglich. Die Voraussetzung für die radargrammetrische Auswertung der Daten sind unterschiedliche Aufnahmewinkel, wodurch geometrische Verzerrungen in Bildern gleicher Gebiete der Erdoberfläche unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Abbildung 1.2 zeigt zwei epipolarrektifizierte Radaraufnahmen eines Berghanges im Ötztalgebiet. In diesen in die Stereonormalform transformierten Bildern befinden sich die korrespondierenden Punkte entlang einer Bildzeile. Im linken Bild wird der Berghang verkürzt dargestellt, während er im rechten Bild gestreckt erscheint. Die eingezeichnete gelbe Linie verdeutlicht diese unterschiedliche Verzerrung. Die Stauchung und Streckung der Berghänge ist aufgrund der Abhängigkeit von der Hangneigung über das gesamte Bild nicht homogen. Da während der Korrespondenzanalyse die Ähnlichkeit zwischen zwei Bildern berechnet wird, erschweren diese geometrischen Unterschiede in den Bildern die Zuordnung korrespondierender Punkte. Werden die Bildstrukturen einander ähnlicher gemacht, kann die Korrespondenzanalyse zuverlässigere Ergebnisse liefern. Dies kann durch eine Skalierung erreicht werden. Dabei wird die relative Geometrie verwendet, um die beiden Bilder einander anzupassen. Vor allem im Hochgebirge, wo die Berghänge stark verzerrt abgebildet werden, ist eine Skalierung sinnvoll. In der vorliegenden Arbeit wurde sie auf zwei verschiedenen Wegen umgesetzt:

1. Lokale Skalierung: Dabei wird lediglich das Referenzfenster während der Korrespondenzanalyse skaliert und somit an die Bildinformationen des Suchfensters angepasst.
2. Semi-globale Skalierung: Die Skalierung wird in einem Schritt auf das gesamte Bild angewendet (global), allerdings mit lokal unterschiedlichen Skalierungsfaktoren.

Beide Herangehensweisen werden mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit der Korrespondenzanalyse zu verbessern, untersucht und beurteilt. Dazu wird für die lokale Skalierung die Idee des adaptiven Korrelationsfensters nach Méric et al. (2011) aufgegriffen und mithilfe simulierter Daten getestet. Der Ansatz der semi-globalen Skalierung wird während der Bildregistrierung umgesetzt, indem die Epipolarrektifizierung nach Gutjahr et al. (2014) durch Verwendung von Höheninformationen adaptiert wird.

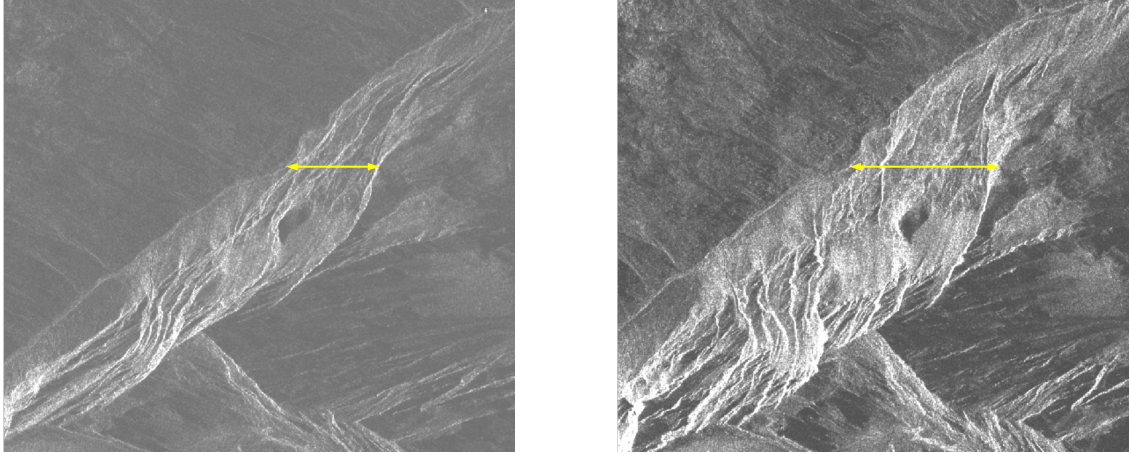


Abb. 1.2: Unterschiedlich starke Stauchung und Streckung eines Berghanges in den Epipolarbildern zweier Aufnahmen, die die Korrespondenzanalyse erschweren.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit beginnt im Kapitel 2 mit der Erläuterung der Grundlagen, die zum Verständnis der Thematik benötigt werden. Dabei wird mit Fokus auf aktive, bildgebende Verfahren zunächst auf das Prinzip des Radars mit realer sowie synthetischer Apertur eingegangen. Anschließend folgt ein Überblick über die Radargrammetrie und die einzelnen Arbeitsschritte bei der radargrammetrischen Datenauswertung anhand von selektiertem Basiswissen aus der digitalen Bildanalyse. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung der radargrammetrischen Auswertung inklusive einem Arbeitsablauf zur Datenprozessierung.

Im Kapitel 3 erfolgt eine Übersicht über den aktuellen Forschungsstand im Bereich der Radargrammetrie. Anschließend werden in Kapitel 4 die beiden Ansätze im Detail beschrieben, die die Bildinhalte vor der Korrespondenzanalyse einander anpassen. Die Ergebnisse dieser Methoden sowie deren Genauigkeiten werden in Kapitel 5 vorgestellt und diskutiert. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiterführende Arbeiten ab.

Diese Arbeit wurde am Joanneum Research Digital im Rahmen des Projektes Vision+ durchgeführt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Grundlagen erläutert, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Ausgehend vom klassischen Radar mit realer Apertur (*Real Aperture Radar*, RAR) erfolgt zunächst ein Überblick der Radarfernerkundung mit Fokus auf dem bildgebenden Radar mit synthetischer Apertur (*Synthetic Aperture Radar*, SAR). Nach einer Vorstellung des Prinzips wird auf die geometrische Auflösung der Radardaten und auf die Aufnahmemodi eingegangen. Im zweiten Teil des Kapitels werden die Prinzipien der Radargrammetrie sowie die Arbeitsschritte der Datenprozessierung erläutert.

2.1 Prinzip des Radars

RADAR steht für *R*ADIO *D*etecting *A*nd *R*anging und kann mit „Funkortung und Abstandsmessung“, üblicherweise mit „Funkmessverfahren“ übersetzt werden. Allgemein ist Radar ein aktives Verfahren zur Ortung von Objekten mittels elektromagnetischer Strahlung. Die Radarantenne sendet kurze Mikrowellenimpulse im Bereich von etwa 0,3 bis 30 GHz aus. Das an Objekten teilweise reflektierte Signal wird in den Impulspausen von derselben Antenne detektiert und daraus Amplitude, Phase, Polarisation und Laufzeit bestimmt (Klausing und Holpp, 2000). Aus diesen Größen lassen sich über die georteten Ziele folgende Informationen gewinnen: relative Entfernung zum Sensor, Winkelposition, Höhe über Grund, Geschwindigkeit, Größe, Struktur und Materialeigenschaften.

Bildgebende, also aktive Radarsysteme haben zum Einen den Vorteil, dass sie durch die eigene Signalerzeugung unabhängig von der Sonneneinstrahlung sind und daher Aufnahmen zu allen Tag- und Nachtzeiten ermöglichen. Zum Anderen sind sie weitgehend unabhängig von meteorologischen Verhältnissen, da Mikrowellen mit einer Wellenlänge größer als 1 cm Wolken, Dunst und Rauch durchdringen (Albertz, 2009). Je nach Wellenlänge besitzen Mikrowellen unterschiedliche Eindringtiefen in Vegetation, Schnee/Eis und Boden, wodurch zusätzliche Informationen über die Objekte gewonnen werden können.

2.1.1 SLAR: Seitensichtradar mit realer Apertur

Für fernerkundliche Aufnahmen ist das Radarsystem in Flugzeugen oder an Satelliten montiert, wodurch die tragende Plattform stets in Bewegung ist. Dieser Umstand wird für eine flächendeckende Aufnahme der Erdoberfläche genutzt: Die senkrecht zur Bewegungsrichtung angebrachte Radarantenne strahlt die Radarimpulse schräg zur Erdoberfläche aus und erfasst die Reflexionssignale von einem schmalen Geländestreifen. Durch die Vorwärtsbewegung der Plattform entsteht aus der systematischen Wiederholung von Senden und

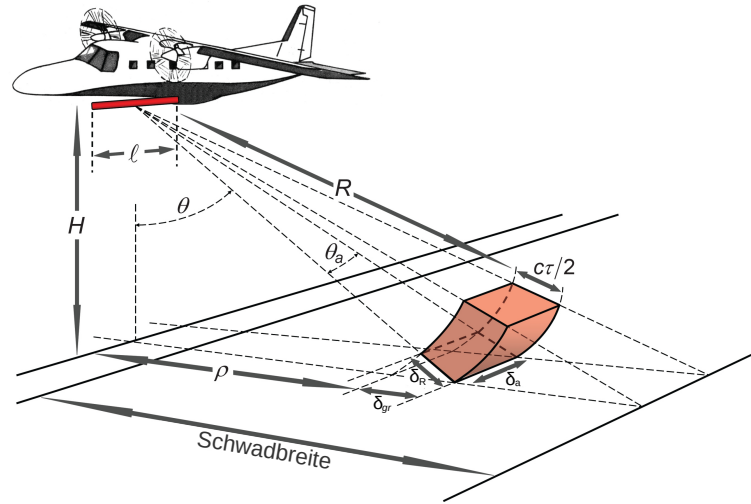


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Radaraufnahme eines Seitensichtradars mit realer Apertur (SLAR). Durch die geradlinige Trägerbewegung wird das neben der Plattform verlaufende Gelände im Streifenmodus (*Stripmap Mode*) abgebildet (SEOS, 2015).

Empfangen eine vollständige zeilenweise Bildaufzeichnung des schräg unter der Plattform verlaufenden Geländestreifens. Wegen der Seitensicht wird ein auf diese Weise arbeitendes Radar *Sidelooking Airborne Radar* (SLAR) genannt (Albertz, 2009). Aufgrund der Schrägaufnahme können weiter vom Radar entfernt liegende Punkte durch Laufzeitmessungen von nahen Punkten unterschieden werden. „Die schräge Abbildungsgeometrie erlaubt die Umrechnung der gemessenen Laufzeit in eine Position am Boden“ (Reinke und Werninghaus, 2009, S. 21).

Geometrische Auflösung

Abbildung 2.1 skizziert die Radaraufnahme mit Seitensicht. Die orthogonalen Bildkoordinaten werden quer zur Flugrichtung als *Entfernung* (engl.: *range*) und in Flugrichtung als *Azimut* bezeichnet. Die Austrittsöffnung ℓ entspricht bei Radarsystemen der Antennenlänge, die die Abstrahlcharakteristik der Signale bestimmt. Daher ist die Winkelauflösung des Sensorsystems θ_a näherungsweise durch das Verhältnis von Wellenlänge λ zur Antennenlänge ℓ des Sensors gegeben (Sörgel, 2006):

$$\theta_a \approx \frac{\lambda}{\ell} \quad (1)$$

Das Auflösungsvermögen in Schrägentfernungsrichtung wird Entfernungsauflösung δ_r genannt und ist durch die Dauer des ausgestrahlten Mikrowellenimpulses (Sendeimpulsdauer τ) beziehungsweise reziprok zur Bandbreite des Sendesignals (B) gegeben:

$$\delta_r = \frac{c \cdot \tau}{2} \approx \frac{c}{2B} \quad (2)$$

mit $\tau \approx \frac{1}{B}$ und c = Lichtgeschwindigkeit.

Demnach kann die Entfernungsaufösung δ_r durch Erhöhung der Bandbreite verbessert werden und ist prinzipiell unabhängig von der Entfernung R , wodurch Messungen aus großer Entfernung möglich sind (Klausing und Holpp, 2000; Sörgel, 2006).

Die Entfernungsaufösung am Boden δ_{gr} ist abhängig vom Depressionswinkel ε , dem Komplement zum Beobachtungswinkel $\theta = 90^\circ - \varepsilon$, und wird umso schlechter, je steiler die Antenne zum Boden gerichtet ist.

$$\delta_{gr} = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot \cos \varepsilon} = \frac{c}{2 \cdot B \cdot \cos \varepsilon} \quad (3)$$

Bei Aufnahmen in Nadirrichtung, d.h. senkrecht nach unten, würde die Auflösung δ_{gr} demnach ins Unendliche steigen.

Die Azimutaufösung δ_a wird im Wesentlichen vom Abstrahlwinkel θ_a bestimmt und wird mit zunehmender Entfernung R schlechter. Aufgrund der Abhängigkeit von θ_a zur Antennenbauweise (Gleichung 1), ist die Azimutaufösung δ_a indirekt proportional zur Antennenlänge:

$$\delta_a = \frac{\lambda}{l} \cdot R \quad (4)$$

Da die Länge der Antenne bauliche Grenzen hat, kann die Winkelaufösung nicht beliebig gesteigert werden. Bei steigender Flughöhe und flacherem Blickwinkel verringert sich das Auflösungsvermögen eines SLAR mit realer Apertur (RAR), weshalb die SLAR-Systeme für große Flughöhen ungeeignet sind.

2.1.2 SAR: Radar mit synthetischer Apertur

Aufgrund der großen Wellenlänge der Signale müssten Radarsysteme unrealistisch große Antennen besitzen, um nur annähernd die räumliche Auflösung wie bei optischen Systemen zu erhalten. Bei SAR-Systemen (*Synthetic Aperture Radar*) wird die Flugbewegung der Trägerplattform ausgenutzt, um eine große Antenne oder Strahlaustrittsfläche (Apertur) elektronisch zu simulieren (Wolff, 1998). Zum Einen werden die Mikrowellenimpulse in einer breiten Keule abgestrahlt und somit die Beleuchtungsdauer der einzelnen Geländepunkte während des Fluges verlängert. Zum Anderen werden die während der Flugbewegung des Sensors empfangenen Dopplersignale gespeichert und verglichen, wodurch sich Bilddaten mit hoher geometrischer Auflösung ableiten lassen. In Abbildung 2.2 ist dieser Prozess skizziert: Bei der ersten Sensorposition (A) befindet sich der Geländepunkt gerade am Rand des beleuchteten Bereichs. Mit der Bewegung des Sensors erfolgt die Aufzeichnung der Amplituden und der Phasenlage der Echosignale mit den genauen relativen Positionsdaten an den

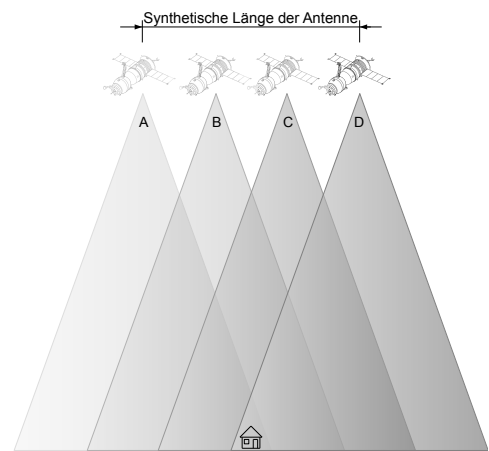


Abb. 2.2: SAR-Aufnahmeprozess (nach Wolff, 1998).

weiteren Sensorpositionen entlang des Flugweges bis zur Position D ganz rechts, bei der das Objekt die Antennenkeule wieder verlässt. Bei der Verarbeitung wird die Tatsache genutzt, dass das Signal eines Geländeobjektes in mehr als nur einem Radarecho enthalten ist und während der Beobachtung aufgrund der richtungsabhängigen Dopplerfrequenz einen typischen Phasenverlauf zeigt (Baldenhofer, 2015).

Die Azimutaufösung entspricht der halben physischen Antennenlänge l und ist unabhängig von Wellenlänge und Entfernung:

$$\delta_{SAR} = \frac{l}{2} \quad (5)$$

Die SAR-Prozessierung basiert auf der Dopplerverschiebung des Sendesignals, die durch die Relativbewegung zwischen Sensor und Objekt entsteht. Hierzu muss die Beleuchtung des Geländes quer zur Flugrichtung erfolgen (Sörgel, 2006). Weitere Voraussetzungen für SAR sind ein frequenzstabiles, voll-kohärentes Radarsystem, ein leistungsfähiger SAR-Prozessor sowie die genaue Kenntnis der Bewegungsbahn und der Geschwindigkeit der Plattform (Wolff, 1998).

2.1.2.1 Eigenschaften der SAR-Bilder

Aufgrund der physikalischen Rahmenbedingungen bei der Aufnahme von SAR-Daten besitzen die Bilder typische radiometrische und geometrische Eigenheiten (nach Sörgel, 2006).

Speckle-Effekt:

Die Voraussetzung für das SAR-Prinzip ist kohärente Strahlung, also Signale mit fester, zeitstabiler Phasenbeziehung zueinander. Daher kommt es zu Interferenzerscheinungen, die sich in den SAR-Bildern in einer körnigen Struktur (*Speckle*) äußern: destruktive Interferenz bewirkt schwarze Bereiche, während konstruktive Interferenz zu sehr hellen Flecken führt. Um diesen Effekt zu reduzieren, können geeignete Filter angewendet oder mehrere Aufnahmen des gleichen Geländestreifens gemittelt werden (*Multilooking*).

Die prinzipbedingte seitliche Aufnahme des Geländes wirkt sich je nach Topographie und abhängig von der Flughöhe und dem Einfallswinkel nachteilig in den SAR-Bildern aus: es entstehen geometrische Verzerrungen (Hangverkürzungen und Überlappungen) und Abschattungen. In Abbildung 2.3 (Sörgel, 2006) ist die vereinfachte Darstellung von SAR als Kreise konstanter Entfernung mit variiertem Beleuchtungswinkel θ und die Problematik der geometrischen Verzerrungen in Radarbildern skizziert.

Verkürzung (F):

Zum Sensor geneigte Flächen mit einer Hangneigung α kleiner als der Betrachtungswinkel θ werden verkürzt abgebildet (*Foreshortening*), weil die reflektierten Signale von Geländeerhebungen gegenüber tiefer gelegenen Objekten verhältnismäßig zu früh empfangen werden ((1) - (2) in Abbildung 2.3).

Überlagerung (L):

Im Extremfall, wenn das zum Sensor geneigte Gelände eine Hangneigung aufweist, die größer ist als der Betrachtungswinkel θ , kommt es zu Umklappeffekten (*Layover*). Da die Schrägentfernung zur Bergspitze (4) kürzer ist als zum Fuße des Berges (3), werden die Geländepunkte in vertauschter Reihenfolge abgebildet und es kommt zu unerwünschter Signalüberlagerung. Dieser Effekt ist besonders im Hochgebirge, aber auch in Städten wegen der vertikalen Gebäudewände von Bedeutung (Sörgel, 2006).

Abschattung (S):

Hinter Berghängen oder anderen erhabenen Objekten kann das Gelände nicht angestrahlt werden, wodurch in diesem Schattenbereich liegende Objekte nicht abgebildet werden. Im Bild äußern sich diese Abschattungen (*Shadowing*) als schwarze Bereiche, die nur Rauschen beinhalten ((4) – (5) und (6) – (7) in Abbildung 2.3).

Durch diese SAR-spezifischen Abbildungseffekte besitzen die Bilddaten, abhängig vom Einfallswinkel, vor allem in bergigem Gelände reduzierten Informationsgehalt.

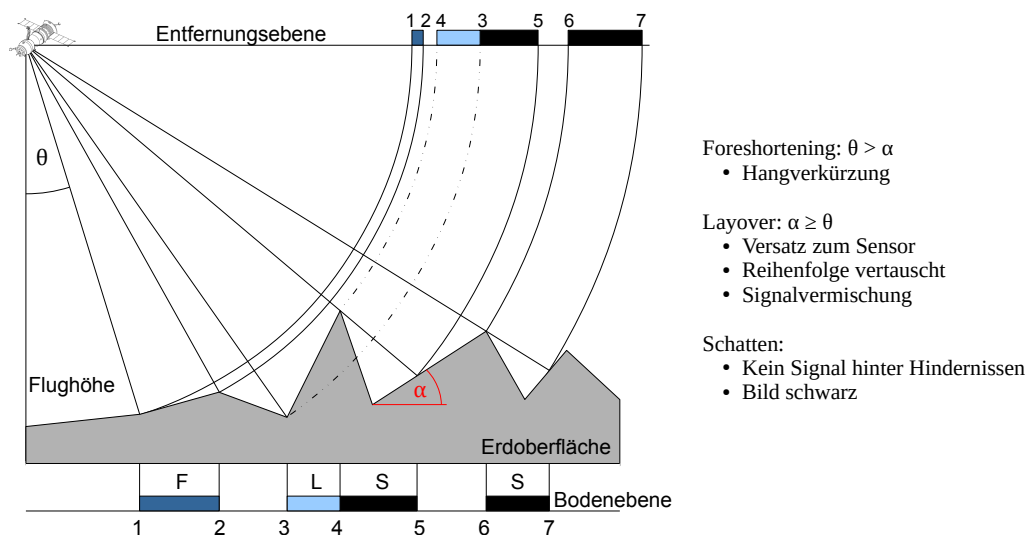


Abb. 2.3: Auswirkung der Schrägsicht auf die SAR-Abbildung: geometrische Verzerrungserscheinungen in den SAR-Bildern (Sörgel, 2006).

2.1.2.2 Satellitenorbits

Die sensortragenden SAR-Satelliten umkreisen die Erde auf polnahen Umlaufbahnen, d.h. die Satelliten bewegen sich auf der einen Seite der Erde Richtung Norden und dann auf der anderen Seite Richtung Süden. Dies wird als aufsteigende (engl. *ascending*) bzw. absteigende (engl. *descending*) Bewegungsrichtung bezeichnet. So wird das gleiche Gebiet jeweils im aufsteigenden und im absteigenden Durchgang aufgezeichnet. Da sich die Erde während des Fluges von Pol zu Pol unter dem Satelliten hinwegdreht, wird die Erdoberfläche in versetzten Streifen aufgenommen.

2.1.2.3 Aufnahmemodi von TerraSAR-X

Durch die geradlinige Bewegung des Sensorträgers und die konstante Ausrichtung der Antennenkeule wird das neben der Plattform verlaufende Gelände im sogenannten Streifenmodus (*Stripmap Mode*) abgebildet (siehe Abbildung 2.4 links). Um die Azimutauflösung über das theoretische Maximum der halben Antennenlänge hinaus zu verbessern, wurde der SpotLight-Betriebsmodus eingeführt (Abbildung 2.4 Mitte). Durch ein Schwenken der Antennenkeule um bis zu $0,75^\circ$ ist die Antenne für längere Zeit auf ein bestimmtes Gebiet gerichtet. Somit wird einerseits der gleiche Geländeabschnitt mit unterschiedlichen Beleuchtungswinkeln abgebildet und andererseits die Beleuchtungsdauer verlängert, was sich direkt als Vergrößerung der synthetischen Apertur auswirkt und somit die Azimutauflösung erhöht (Klausing und Holpp, 2000). Beim 2013 implementierten Staring SpotLight-Modus beträgt der erweiterte Schwenkwinkel der Antennenkeule bis zu $2,2^\circ$, wodurch eine Azimutauflösung von 24 cm erreicht werden kann (Abbildung 2.4 rechts). In Tabelle 2.1 sind die Parameter und erreichbaren Auflösungen der drei Aufnahmemodi Stripmap, SpotLight und Staring SpotLight aufgelistet.

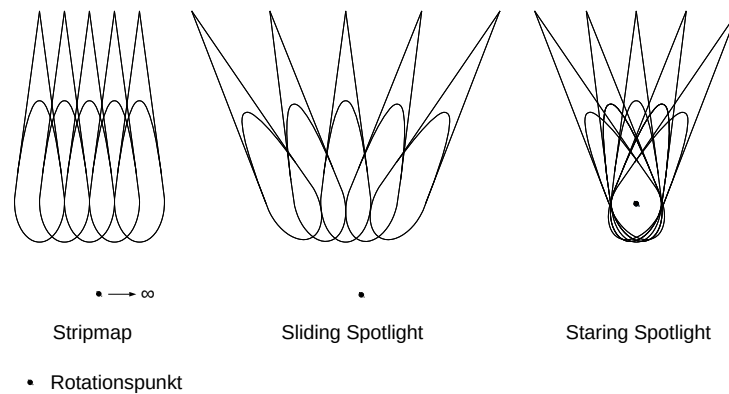


Abb. 2.4: Prinzip der Aufnahmemodi *Stripmap*, *Sliding Spotlight* und *Staring Spotlight* (DLR).

Tab. 2.1: Parameter der Aufnahmemodi von TerraSAR-X (aus dem TerraSAR-X *Image Product Guide*).

	Stripmap ¹	Sliding Spotlight	Staring Spotlight
Szenenausdehnung Länge x Breite [km]	50 x 30	5 x 5	2,5 – 2,8 x 4,6 – 7,5
Beleuchtungswinkel ²	20° – 45°	20° – 55°	20° – 45°
Schwenkwinkel der Antennenkeule	-	$\pm 0,7^\circ$	$\pm 2,2^\circ$
Azimutauflösung	3,3 m	1,1 m	0,24 m
Schrägentfernungs- auflösung	1,2 m	1,2 m	0,6 m

¹Angaben beziehen sich auf Einzel-Polarisations-Produkte.

²Full Performance Range.

2.2 Radargrammetrie

Mittels radargrammetrischer Auswertung werden aus Radarbildern geometrische Parameter abgeleitet (Leberl, 1990). Wie bei der klassischen Photogrammetrie werden dazu mindestens zwei Aufnahmen von unterschiedlichen Sensorpositionen des gleichen Gebietes auf der Erdoberfläche benötigt, um die bei der Abbildung der Objektpunkte auf die Bildebene verloren gegangene Tiefeninformation zu rekonstruieren (Jähne, 2012).

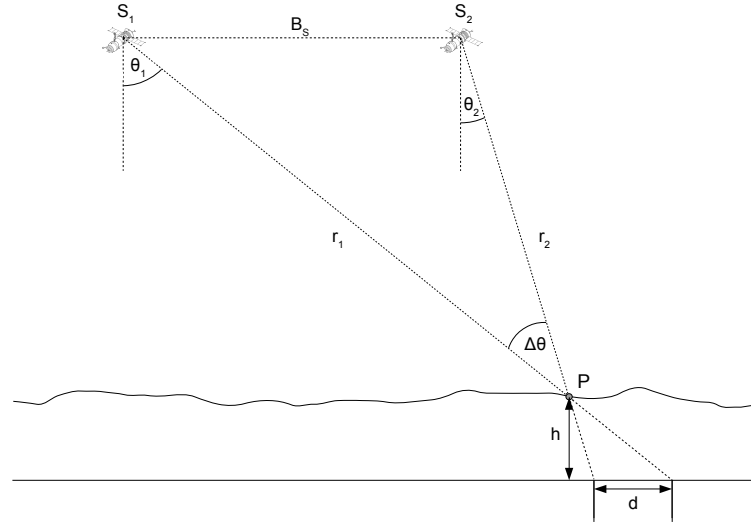


Abb. 2.5: Prinzip der radargrammetrischen Akquisition (nach Méric et al., 2011). Der Geländepunkt P wird von den beiden SAR-Sensoren S_1 und S_2 unter den Beobachtungswinkeln θ_{v1} und θ_{v2} detektiert und in den Bildebenen auf unterschiedlichen Positionen abgebildet. Aus der Differenz dieser Positionen, der Disparität d , kann die Höhe h abgeleitet werden.

Abbildung 2.5 zeigt eine gleichseitige stereoskopische Konfiguration, bei der sich die Szene auf der gleichen Seite der Radarsysteme befindet. Die räumliche Distanz zwischen den beiden Sensorpositionen wird als Basislinie B_S bezeichnet. Aufgrund der verschiedenen Blickwinkel und Satellitenpositionen wird der Beobachtungspunkt P mit der Höhe h auf unterschiedliche Positionen in der Bildebene abgebildet. Die Abbildungen des gleichen Geländepunktes in unterschiedlichen Bildern werden als *korrespondierende* oder *homologe* Punkte; die Differenzstrecke zwischen diesen Positionen als *Parallaxe* p oder *Disparität* d bezeichnet. Der Konvergenzwinkel $\Delta\theta = \theta_{v1} - \theta_{v2}$ ist als Schnittwinkel der beiden Sichtverbindungen der Sensorpositionen definiert. Dieser Winkel wird größer, je länger die Basislinie B_S ist. Mithilfe der Disparität wird die Höhe h des Geländepunktes abgeleitet:

$$h = \frac{d}{\cot \theta_2 - \cot \theta_1} \quad (6)$$

Für die geometrische Rekonstruktion aus den Stereobilddaten müssen die sogenannten Entfernungsgleichungen der Radarbeobachtung ausgewertet werden, die die Beziehung zwischen den Bildkoordinaten (x, y) oder äquivalent Zeit- und Entfernungskordinaten (t, r) und den 3-D Koordinaten des Geländepunktes $\vec{P} = (P_x, P_y, P_z)$ herstellen.

Ausgehend von der allgemein gültigen Dopplergleichung mit der Dopplerfrequenz f_D

$$f_D = \frac{2(\dot{\vec{P}} - \dot{\vec{S}})(\vec{P} - \vec{S})}{\lambda|\vec{P} - \vec{S}|} \quad (7)$$

gilt für Daten, die in der Null-Doppler-Geometrie ($f_D = 0$) prozessiert werden, was für TerraSAR-X Daten der Fall ist:

$$|\vec{P}_1 - \vec{S}_1| = r_1 \quad (8)$$

$$|\vec{P}_2 - \vec{S}_2| = r_2 \quad (9)$$

$$(\vec{P}_1 - \vec{S}_1) \cdot \dot{\vec{S}}_1 = 0 \quad (10)$$

$$(\vec{P}_2 - \vec{S}_2) \cdot \dot{\vec{S}}_2 = 0 \quad (11)$$

mit

$\vec{S}_{1,2}$ - Sensorpositionen,

$\dot{\vec{S}}_{1,2}$ - Sensorgeschwindigkeiten,

$\vec{P}_{1,2}$ - Objektpositionen und

$r_{1,2}$ - Entfernungen zwischen Sensor und Objekt (siehe Abbildung 2.5).

Mittels der Korrespondenzanalyse werden diejenigen Bildpunkte in Beziehung gesetzt, die in beiden Szenen das gleiche Objekt beschreiben, für die also $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$ (im Folgenden $\vec{P}$) gilt. Somit reduziert sich das Gleichungssystem auf vier Gleichungen mit den drei Unbekannten $\vec{P} = (P_x, P_y, P_z)$, wodurch es überbestimmt ist (Schreer, 2005). Diese dreidimensionalen geometrischen Daten werden unter Verwendung der Koordinaten (Position und Geschwindigkeit) des Satelliten entlang seines Flugweges extrahiert. Geometrisch betrachtet bilden die Doppler- und Entfernungsgleichungen zwei Flächen, die sich in zwei Punkten schneiden: Die Entfernung r eines Punktes beschreibt aufgrund der Laufzeitmessung eine Entfernungskugel im Raum mit der Satellitenposition im Zentrum. Das Azimut a bildet einen Dopplerkegel mit der Flugbahn als Kegelachse, der wegen der Null-Doppler-Frequenz rechtwinklig zur Flugbahn eine senkrechte Ebene darstellt. Die Schnittmenge der Entfernungskugel und der Dopplerebene liefert zwei Lösungen, wobei nur eine davon aufgrund der Richtung des Radarstrahls gültig ist (Leberl, 1998). Somit kann das überbestimmte Gleichungssystem (Formel 8 bis 11) über einen räumlichen Vorwärtsschnitt eindeutig gelöst werden.

2.2.1 Korrespondenzanalyse

Die Grundlage für die Radargrammetrie ist die Korrespondenzanalyse, ein klassisches Aufgabenfeld der digitalen Bildanalyse. Zwei Abbildungen des gleichen Motivs werden mit der Zielsetzung analysiert, korrespondierende Bildpunkte (engl. *pixel* - picture element) oder Bildmerkmale in beiden Ansichten zu finden und deren Disparität zu bestimmen (Schre-

er, 2005). Basierend auf dem Lösungsansatz können die verwendeten Stereoalgorithmen in zwei Kategorien eingeteilt werden: die lokalen, pixelbasierten Verfahren und die globalen Verfahren. Lokale Algorithmen ermitteln Korrespondenzen für jedes Bildelement separat, die Bilder werden demnach pixelweise miteinander verglichen. Da einzelne Bildpunkte jedoch lediglich in ihrer Intensität unterschieden werden können und die Bildstruktur in der Umgebung des Bildpunktes wesentlich aussagekräftiger ist, wird ein Fenster, ein sogenannter Block, um diese Bildpunkte betrachtet. Daher werden diese Verfahren auch als *Block-Matching* (engl. *matching* = Anpassung) bezeichnet (Schreer, 2005). Bei den globalen Verfahren dagegen wird nicht nur die unmittelbare Nachbarschaft der betrachteten Bildpunkte in die Analyse einbezogen, sondern auch Intensitätsänderungen des gesamten Bildes berücksichtigt.

2.2.1.1 Ähnlichkeitsbedingungen

Die Formulierung verschiedener Ähnlichkeitsbedingungen vereinfacht den Verarbeitungsprozess innerhalb der Korrespondenzanalyse wesentlich und liefert zuverlässigere Ergebnisse (Schreer, 2005).

Epipolarbedingung

Die Epipolarometrie wird im Folgenden anhand eines perspektivischen Bildpaares erklärt (Abbildung 2.6). Das Kamerazentrum des rechten Bildes C_r wird im Epipol e_l im linken Bild dargestellt und umgekehrt. Beide Epipole und Projektionszentren liegen auf einer Geraden. Die Projektion des Objektpunktes X auf jede Bildebene wird als x_l bzw. x_r gekennzeichnet. Wird X nun entlang des Sehstrahls nach X_l bewegt, bleibt die Projektion im linken Bild x_l . Die Projektion dieser Punkte entlang des Sehstrahls (X_1, X_2, X_3) auf die rechte Bildebene liegen hingegen auf einer Linie (l_r). Diese Linie wird als Epipolarlinie zum Punkt x_l bezeichnet und kann als Schnittlinie der Epipolarebene, die durch die Pro-

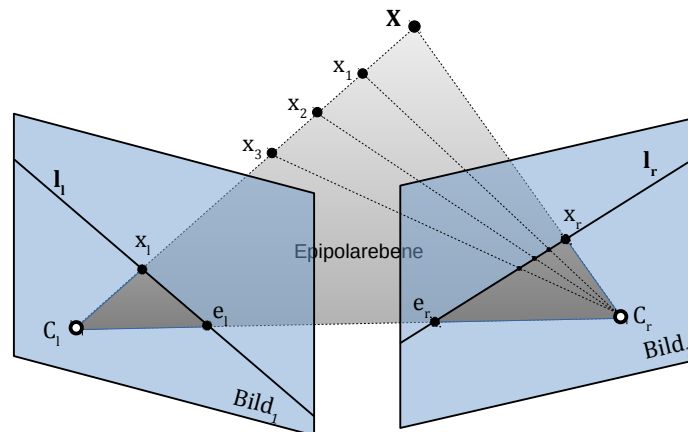


Abb. 2.6: Anschauliche Darstellung der Epipolarbedingung in perspektivischen Abbildungen [nach (Zhang, 1998)]. Zwei Kameras mit ihren Projektionszentren C_l und C_r bilden den Beobachtungspunkt X auf den Bildebenen als Bildpunkte x_l und x_r ab. Die Abbildungen der Kamerazentren im jeweils anderen Bild werden als Epipole (e_l und e_r) bezeichnet. Die Verbindung zwischen dem Epipol und dem Bildpunkt bildet die Epipolarlinie (l_l , l_r), die gemeinsam mit dem Objektpunkt die Epipolarebene aufspannt.

jektionszentren C_l , C_r und den Objektpunkt X aufgespannt wird, mit der entsprechenden Bildebene definiert werden. Die Epipolarbedingung besagt demnach, dass der korrespondierende Punkt einer Abbildung eines 3D-Punktes im linken Stereopartner nur auf der entsprechenden Epipolarlinie des rechten Stereobilds liegen kann und umgekehrt. (Gutjahr et al., 2014; Longuet-Higgins, 1981; Zhang, 1998).

Im allgemeinen Fall der Stereokonfiguration müssen die Epipolarlinien nicht waagrecht in der Bildebene liegen. Erst nach einer Transformation beider Bilder in den Stereonormalfall, der sogenannten Epipolarrektifizierung, verlaufen sie parallel zueinander und entsprechen dadurch den einzelnen Bildzeilen. Dies vereinfacht die Suche nach Punktkorrespondenzen, da homologe Punkte auf der selben Bildzeile liegen und keine Disparität in y -Richtung vorhanden ist (Stormberg, 2011). Daher kann die Suche nach korrespondierenden Bildpunkten auf eine Dimension entlang der Epipolarlinie reduziert werden (Schreer, 2005), was neben der Ersparnis an Rechenzeit auch die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten reduziert.

Bei perspektivischen Stereopaaren basiert die Rektifizierung bei den meisten Verfahren auf einer perspektivischen Bildtransformation (Homographie) beider Bilder mittels einer zuvor geschätzten Fundamentalmatrix (Stormberg, 2011). Da sich Radarbilder in die mit Zeilenscanner detektierten Aufnahmen einordnen lassen, muss bei der Rektifizierung auch die komplexere physikalische Struktur berücksichtigt werden (Wang et al., 2011). Nach Gutjahr et al. (2014) ist eine quasi-epipolare Rektifizierung für TerraSAR-X Daten möglich.

Beschränkter Disparitätsbereich

Je nach Einsatzgebiet kann von einem begrenzten Höhenbereich ausgegangen werden. Liegen ausreichende Höheninformationen über das Gebiet vor, lässt sich wegen der proportionalen Beziehung zwischen Disparität und Höhe auch der Disparitätsbereich einschränken. Somit muss lediglich in einem bestimmten Intervall nach korrespondierenden Punkten gesucht werden. Diese Eingrenzung des Suchbereiches „führt zu einer schnelleren Analyse und erlaubt eine robustere Zuordnung, da weniger mögliche Kandidaten in Frage kommen.“ (Schreer, 2005, S. 131)

Konsistenztest

Bei der Korrespondenzanalyse werden im ersten Schritt mit den Bildstrukturen oder Merkmalen des rechten Bildes mögliche Korrespondenzen im linken Bild gesucht und die Disparitäten in diese Richtung ermittelt. In einem zweiten Schritt wird die Zuweisungsrichtung vertauscht: nun werden die Merkmale der linken Ansicht verwendet, in der rechten Ansicht nach Korrespondenzen gesucht und die Disparität in die entgegengesetzte Richtung ermittelt. Die Differenz zwischen diesen beiden Disparitäten wird *backmatching distance* genannt, die im Idealfall Null ist. Übersteigen die Disparitäten in beide Richtungen eine bestimmte Abweichung, wird diese als falsche Zuordnung verworfen (Perko, 2004).

2.2.1.2 Flächenbasierte Verfahren

Bei der flächenbasierten Korrespondenzanalyse wird für jede Position (u_1, v_1) im Bild 1 (Referenzbild) ein Referenzfenster der Größe (m, n) um diesen Punkt (Aufpunkt) gebildet. Die Bildstruktur innerhalb dieses Referenzblocks wird mit einem entsprechenden Musterblock in Ansicht 2 (Suchbild) verglichen. Für jede um die Positionen (k, l) verschobene Position wird das Ähnlichkeitsmaß zwischen beiden Bildblöcken bestimmt. Die Bildpunktposition ergibt sich, wenn für das Referenzfenster das Musterfenster mit der größten Ähnlichkeit gefunden wurde. Die Verschiebung des Fensters ist die Disparität $d(u, v)$. In Abbildung 2.7 ist das flächenbasierte Verfahren in Epipolargeometrie dargestellt, bei der die Disparität lediglich eine horizontale Komponente enthält. Wurden für alle Abbildungen die Disparitäten erfolgreich berechnet, so bildet das Ergebnis eine sogenannte Disparitätenkarte.

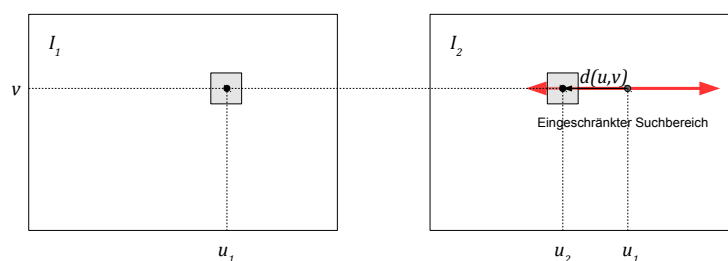


Abb. 2.7: Prinzip der flächenbasierten Korrespondenzanalyse nach Schreer (2005) für den eindimensionalen Fall ($v_1 = v_2$) und eingeschränktem Suchbereich (rot markiert). Innerhalb des Suchbereichs wird die Ähnlichkeit von Bildpunkten in den Fenstern von Bild 1 und 2 bestimmt und deren Disparität $d(u, v)$ berechnet.

2.2.1.3 Ähnlichkeitsmaße

Das Ähnlichkeitsmaß drückt die Ähnlichkeit zwischen möglichen Korrespondenzen aus und ist somit die fundamentale Komponente eines jeden Stereoalgorithmus'. Zur Berechnung der Ähnlichkeit von zwei Bildblöcken können parametrische und nicht-parametrische Ähnlichkeitsmaße verwendet werden. Bei parametrischen Maßen wird ein Koeffizient in Abhängigkeit von den Intensitätswerten innerhalb der Bildblöcke berechnet, der die Ähnlichkeit dieser Blöcke repräsentiert. Als ein Standard für die radargrammetrische Korrespondenzanalyse gilt der normalisierte Kreuzkorrelationkoeffizient. Nicht-parametrische Ähnlichkeitsmaße basieren auf der lokalen Anordnung der Intensitätswerte innerhalb der Bildblöcke. Hier ist die Censustransformation aktuell eines der nicht-parametrischen Ähnlichkeitsmaße mit der höchsten Effizienz (Hirschmüller und Scharstein, 2008).

Normalisierte Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelationsfunktion (engl. *Normalized Cross Correlation*, NCC) ist bei flächenbasierten Verfahren ein weit verbreiteter Ansatz, um die Ähnlichkeit zwischen zwei Bildausschnitten I_1 und I_2 gleicher Dimension zu beschreiben. Durch die Normalisierung der Kreuzkorrelation auf die Gesamtenergie der beiden Bildausschnitte werden lediglich die

relativen Unterschiede zwischen beiden Bildblöcken verglichen. Somit ist die normalisierte Kreuzkorrelation invariant gegenüber linearen Grauwertänderungen. Als ein parametrisches Ähnlichkeitsmaß wird der Kreuzkorrelationskoeffizient ρ wie folgt ermittelt:

$$\rho = \frac{\text{Cov}[I_1, I_2]}{\sqrt{\text{Var}[I_1]\text{Var}[I_2]}} \quad (12)$$

mit den Operatoren $\text{Cov}[\]$ - Kovarianz und $\text{Var}[\]$ - Varianz.

Der berechnete Koeffizient ρ liegt im Bereich $[-1; +1]$ und repräsentiert die Ähnlichkeit von I_1 und I_2 , wobei die Bildausschnitte ähnlicher sind, je größer ρ ist.

Censustransformation

Die Censustransformation ist eine nicht-parametrische, lokale Transformationsmethode, die die relative Intensität beider Bilder verwendet und somit robust gegen radiometrische Unterschiede ist. Jedem Bildelement wird eine Bitkette zugewiesen, die das relative Intensitätsverhältnis der Bildpunkte im Messfenster bezüglich der Intensität des zentralen Pixels beschreibt. Ist die Intensität eines Bildelementes geringer als die des Aufpunktes, wird an dieser Stelle der Bitkette eine Eins gesetzt, ansonsten bleibt sie Null (Abbildung 2.8). Die Länge der Bitkette entspricht folglich der Anzahl der verglichenen Bildelemente im Messfenster abzüglich des Aufpunktes. Bei Betrachtung der direkt benachbarten Bildelemente, also einer 3x3-Umgebung, besitzt die Bitkette eine Länge von 8 Bits, was einem Byte entspricht. Die Ähnlichkeit zweier Bildelemente erfolgt über einen Vergleich der beiden Bitketten, wobei die Anzahl der unterschiedlichen Bits, die sogenannte Hamming-Distanz verwendet wird (Zabih und Woodfill, 1994). Je geringer die Hamming-Distanz, desto größer ist die Ähnlichkeit der betrachteten Bildelemente.

Bei der modifizierten Censustransformation werden die Elemente im Messfenster nicht mit der Intensität des Aufpunktes, sondern mit dem Mittelwert der 3x3-Umgebung verglichen. Die Bitkette verfügt demnach über einen Bit mehr als bei der konventionellen Censustransformation (Fröba und Ernst, 2004).

Als Ähnlichkeitsmaß wird die normalisierte Hamming-Distanz verwendet, indem durch die Länge der Bitkette dividiert wird, so dass die Werte im Bereich $[0; 1]$ liegen.

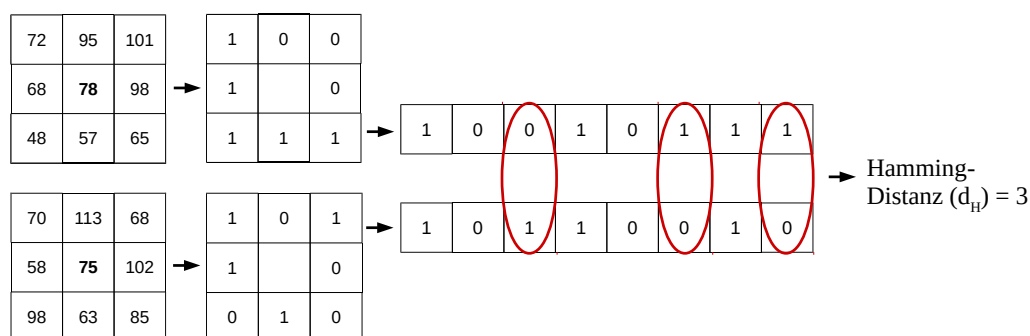


Abb. 2.8: Beispiel Censustransformation. Ist der Intensitätswert im Vergleich zum Wert des Aufpunktes kleiner, wird die entsprechende Position in der Bitkette zu Eins gesetzt, ansonsten bleibt sie Null. Die Anzahl der unterschiedlichen Bits im Vergleich zweier Bitketten ergibt die Hammingdistanz d_H .

2.2.1.4 Semiglobale Optimierung

Der *semi-global Matching* (SGM) Stereoalgorithmus von Hirschmüller (2005) ist eine Optimierung der Disparitätenkarte, bei der unrealistische Disparitätensprünge unterdrückt werden. Die Glättung von benachbarten Disparitäten basiert dabei auf der Einführung zusätzlicher Nebenbedingungen und der Vergabe von *Straftermen* bei der Verletzung dieser Bedingungen. Das Ziel ist es, die Gesamtenergie $E(D)$, die sich aus der Summe der Ähnlichkeitsmaße (hier *Kosten*) und den Strafkosten ergibt, zu minimieren:

$$E(D) = \sum_{\mathbf{p}} C(\mathbf{p}, D_{\mathbf{p}}) + \sum_{\mathbf{q} \in N_{\mathbf{p}}} P_1 T[|D_{\mathbf{p}} - D_{\mathbf{q}}| = 1] + \sum_{\mathbf{q} \in N_{\mathbf{p}}} P_2 T[|D_{\mathbf{p}} - D_{\mathbf{q}}| > 1] \quad (13)$$

mit $P_2 \geq P_1$

Die Funktion $T[\]$ ergibt 1, falls ihr Argument wahr ist, und 0, wenn ihr Argument falsch ist. Der erste Term der Energiefunktion berechnet die Summe der Kosten $C(p, D_{\mathbf{p}})$ für alle Pixel $\mathbf{p}$ mit ihren Disparitäten $D_{\mathbf{p}}$. Der zweite Term addiert einen konstanten Strafterm P_1 für alle Bildelemente $\mathbf{q}$ in der Nachbarschaft $N_{\mathbf{p}}$ von $\mathbf{p}$, für die sich die Disparität geringfügig (d.h. um 1 Pixel) ändert. Ähnlich bestraft der dritte Term größere Disparitätensprünge mit einem höheren Strafterm P_2 . Dieser Wert P_2 kann optional an die Texturierung des Eingangsbildes angepasst werden, indem homogene und strukturierte Regionen unterschiedliche, abgestimmte Strafterme P'_2 erhalten. In homogenen Gebieten sind Diskontinuitäten, d.h. 3D-Sprünge, unwahrscheinlich. Daher ist es sinnvoll, den Wert P_2 in homogenen Gebieten zu erhöhen und somit eine eher glatte Oberfläche zu generieren, während dieser in texturierten Gebieten verringert wird, um 3D-Sprünge wahrscheinlicher zu machen. Diskontinuitäten in den Disparitäten äußern sich oft in unterschiedlichen Helligkeitswerten des Amplitudenbildes. Dieser Zusammenhang wird genutzt, um P_2 an den absoluten Gradienten der Intensitätswerte in die aktuelle SGM-Pfadrichtung (lokaler Intensitätsgradient) anzupassen:

$$P'_2 = \frac{P_2 \cdot \mu}{|I_{b\mathbf{p}} - I_{b\mathbf{q}}|} \quad (14)$$

mit μ - mittlerer absoluter Gradient über alle Pfadrichtungen im Referenzbild.

Das bedeutet, dass P'_2 bei hohen Gradienten verringert und bei mittleren Gradienten zu P_2 wird.

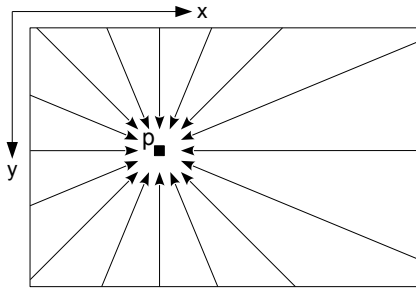


Abb. 2.9: SGM: 16 Pfade zur Berechnung der kumulierten Kosten $S(\mathbf{p}, d)$ (Hirschmüller, 2005).

Das Problem der Stereoanalyse kann nun als Suche nach der Disparitätenkarte mit minimierter Energie $E(D)$ formuliert werden (Hirschmüller, 2005). Um bei der Betrachtung und Glättung von benachbarten Diskontinuitäten keine Streifen zu bilden, werden die Kosten nicht nur in zwei Richtungen (Bildspalten und -zeilen) berücksichtigt, sondern eindimensional in alle Richtungen gleichmäßig aufsummiert. Die kumulierten Kosten $S(\mathbf{p}, d)$ für alle Pixel $\mathbf{p}$ und Disparitäten d ergeben sich durch Aufsummierung der Kosten $L_{\mathbf{r}}$

entlang eines eindimensionalen Pfades in alle Richtungen $\mathbf{r}$, der in $\mathbf{p}$ endet (Abb. 2.9):

$$S(\mathbf{p}, d) = \sum_{\mathbf{r}} L_{\mathbf{r}}(\mathbf{p}, d). \quad (15)$$

Der Algorithmus wird als *semi-global* bezeichnet, weil er die globale Energie minimiert, indem eine große Anzahl von eindimensionalen Minimierungsproblemen gelöst wird. Die Voraussetzung für den SGM ist die Epipolarrektifizierung der Bilder in den Stereonormalfall.

2.2.1.5 Hierarchischer Lösungsansatz mit Auflösungspyramide

Eine Auflösungspyramide besteht aus einer Sequenz von Bildern mit unterschiedlicher Auflösung, die durch Unterabtastung gewonnen wird (siehe Abbildung 2.10). Zur Vermeidung sogenannter Aliasing-Effekte werden die Originalbilder vor der Unterabtastung tiefpassgefiltert. Beginnend auf der obersten Ebene mit der geringsten Auflösung wird in einem bestimmten Suchbereich die Korrespondenz zwischen den beiden Bildern hergestellt. Das Ergebnis dient als Näherung für die nächste Auflösungsebene (Pfeile in Abbildung 2.10 rechts), wobei sich der Suchbereich im Verhältnis zur Bildgröße reduziert (Schreer, 2005). Die Ergebnisse pflanzen sich entsprechend bis zur untersten Pyramidenstufe fort. So ist es auf geringer Auflösungsebene möglich, große Strukturen (geringe Frequenz) zu detektieren und mit zunehmender Auflösung immer feinere Details hinzuzufügen (Nascetti, 2013), was zu einer genaueren Disparitätsbestimmung führt. Allerdings können sich auch Fehler aus den vorangegangenen Stufen fortpflanzen. Durch den Aufbau einer Bildpyramide reduziert sich die Rechenzeit bei der Herstellung der Korrespondenz, jedoch muss nun zusätzlicher Aufwand für die Erstellung der Bildpyramide betrieben werden (Schreer, 2005).

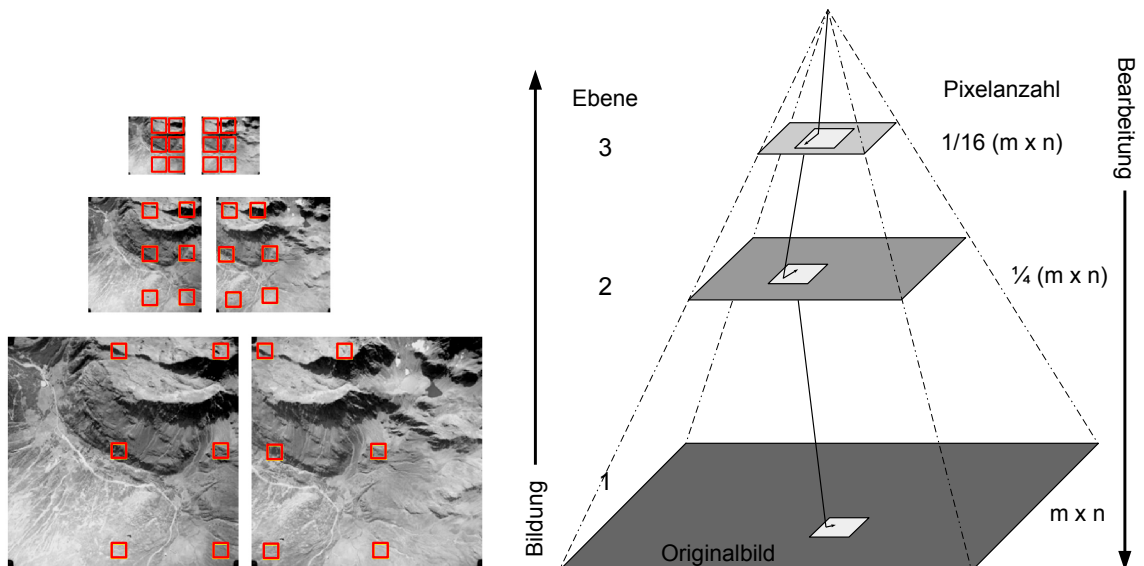


Abb. 2.10: Auflösungspyramide mit Auflösungsreduktionsfaktor vier, sprich einer 2x2 Reduktion pro Pyramidenstufe. Dieser Faktor ist beliebig wählbar. Die Pfeile in der Auflösungspyramide (rechts) repräsentieren die Näherungslösungen der Disparität für die jeweils nächste Ebene.

2.2.1.6 Filterung

Um ungewollte Artefakte aus Bildern zu entfernen bzw. zu unterdrücken, können Filter angewendet werden. Diese verändern den Grauwert eines Pixels in Abhängigkeit der Grauwerte der Nachbarpixel, indem ein Fenster (Kern) mit vorgegebener Größe und Inhalt über das gesamte Bild bewegt wird. Der Grauwert des Ausgabebildes ist eine Funktion der Pixel innerhalb des Fensters. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Filter vorgestellt.

Medianfilter Als nicht-linearer Filter ist das Ergebnis des Medianfilters der Median der Grauwerte im Fenster. Daher eignet sich dieser Filter besonders, um Ausreißer zu beseitigen.

Gaußfilter Der Gaußfilter ist ein linearer Filter, dessen Gewichte einer zweidimensionalen Gaußverteilung entsprechen.

Frostfilter Der Frostfilter ist ein exponentiell gedämpfter kreissymmetrischer Filter und verwendet als adaptiver Filter die lokale Statistik. Der gefilterte Wert ergibt sich aus der gewichteten Summe aller Pixelwerte innerhalb des Filterkerns und der lokalen Varianz. Der Gewichts- oder Dämpfungsfaktor ist ein von der Entfernung zur Filtermitte abhängiger Wert. Der Frostfilter reduziert das Speckle in Radarbildern ohne die Kanten zu dämpfen (Zhenghao und Ko, 1994).

Er ist nur ein Beispiel für einen Speckle-Filter. Andere Filter (z.B. Lee) sind durchaus auch vorstellbar, wurden in dieser Arbeit allerdings nicht verwendet.

2.2.2 Radargrammetrische Oberflächenrekonstruktion

Die radargrammetrische Prozessierung zur Erstellung eines Oberflächenmodells erfordert mehrere Verarbeitungsschritte, die in drei Abschnitte eingeteilt werden können: Vorverarbeitung, Korrespondenzanalyse und geometrische Rekonstruktion. Der in Abbildung 2.11 skizzierte Arbeitsablauf folgt der am Joanneum Research angewandten und in Gutjahr et al. (2014) beschriebenen Prozessierung.

Während des Einlesens der Daten wird lediglich die Amplitude importiert, da die Phaseninformation für die Radargrammetrie nicht benötigt wird. Die Bilder werden zur Specklereduzierung direkt mit einem Frostfilter gefiltert und ggf. einem Multilooking unterzogen. Anschließend erfolgt basierend auf der Sensorgeometrie die Epipolarrektifizierung beider Bilder in zwei Schritten nach Wang et al. (2011). Beide Bilder werden zunächst auf eine gemeinsame lokale Tangentialebene mit einer festen Höhe (beispielsweise der mittleren Höhe des abgebildeten Gebietes) projiziert. Anschließend wird eine Helmert-Transformation mit einem festen Maßstab so auf beide projizierten Bilder angewendet, dass die Epipolarlinien den gleichen Bildzeilen entsprechen.

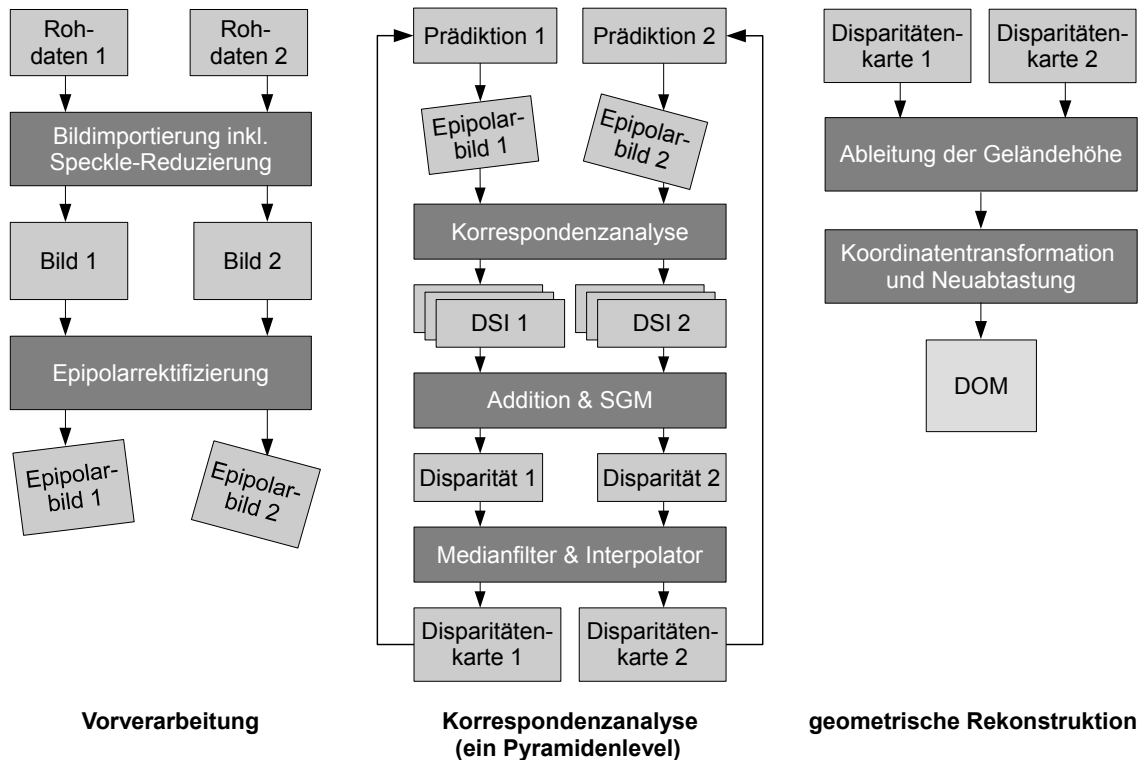


Abb. 2.11: Radargrammetrische Verarbeitungskette nach Gutjahr et al. (2014).

Die anschließende Korrespondenzanalyse wird hierarchisch mit drei Pyramidenebenen durchgeführt. Dabei dient eine aus einem SRTM-Höhenmodell berechnete grobe Disparitätenkarte zur Einschränkung des Suchbereichs als Näherungswert für die oberste Pyramidenstufe. Als Ähnlichkeitsmaße werden der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient sowie eine Censustransformation mit Hamming-Distanz, als Stereoalgorithmus die semiglobale Optimierung verwendet. Die Korrelationswerte werden in einem dreidimensionalen Disparitätsvolumen (engl. *Disparity Space Image* - DSI) gespeichert, wobei die ersten beiden Dimensionen die Bildkoordinaten und die dritte Dimension den Suchbereich repräsentieren. Das DSI wird jeweils mit drei verschiedenen Fenstergrößen (5, 7, 15) berechnet, anschließend additiv kombiniert und die möglichen Korrespondenzen unter Verwendung der semi-globalen Optimierung selektiert. Der Schwellwert des folgenden Konsistenztests zur Ausreißerdekektion und -verwerfung beträgt 1,5 Pixel (*backmatching distance*). Die Disparitäten sowie die *backmatching distance* werden mit einem Medianfilter geglättet und die undefinierten Regionen der resultierenden Disparitätenkarte mit den Umgebungswerten aus 16 Richtungen flächenbasiert interpoliert. Verdeckungen werden wie in Hirschmüller und Scharstein (2008) behandelt. Die resultierende Disparitätenkarte wird als Startlösung (Prädiktion) in das nächste Pyramidenlevel übergeben.

Aus der finalen Disparitätenkarte der untersten Ebene der Auflösungspyramide wird das digitale Höhenmodell abgeleitet. Dazu werden die Ergebnisse der Korrespondenzanalyse mithilfe der inversen Adressen, die im Rektifizierungsschritt verwendet wurden, zu-

nächst in die Geometrie der Originalbilder transformiert. Mit Anwendung eines räumlichen Vorwärtsschnittes und Lösung der radargrammetrischen Gleichungen (8) - (11) in einem Ausgleich werden die zugehörigen Bodenkoordinaten berechnet, die zunächst unregelmäßig über die Oberfläche verteilt sind. Aus dieser 3D-Punktwolke wird über Neuabtastung und Interpolation ein regelmäßiges Höhenraster und somit das Oberflächenmodell im Objektkoordinatensystem erstellt.

Liegt eine Abdeckung durch mehr als zwei Bilder vor, wird nicht nur ein Stereopaar prozessiert, sondern mehr als ein Bildpaar verwendet. Dies soll zum Einen die geometrische Zuverlässigkeit für die Berechnung der Bodenkoordinaten steigern und zum Anderen aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmewinkel die Datenlücken in abgeschatteten Bereichen schließen.

Aus jedem Stereopaar werden zwei Oberflächenmodelle erstellt, in dem die Korrespondenzanalyse in beide Richtungen, d.h. einmal von Bild 1 zu Bild 2 und anschließend in umgekehrter Reihenfolge, durchgeführt wird. Somit liegen bei zwei Stereopaaren vier Oberflächenmodelle vor, die anschließend nach Rumpler et al. (2013) fusioniert werden.

Des Weiteren werden zur Vervollständigung der Geländeinformationen die Höhenmodelle aus Daten des aufsteigenden und absteigenden Orbits miteinander vereinigt.

3 State of the Art

Radargrammetrie war die erste angewandte Methode zur Ableitung von Oberflächenmodellen aus flugzeuggestützten Radardaten. Ende der 1970er bis Ende der 1980er wurde die Radargrammetrie erfolgreich an Radardaten der ersten zivilen Satellitenmissionen mit synthetischer Apertur erprobt (Leberl et al., 1986; Leberl, 1990). Aufgrund der geringen Genauigkeit¹ ist die Methodik in den neunziger Jahren in den Schatten der Radarinterferometrie getreten. Erst mit der Verfügbarkeit hochauflösender SAR-Daten ab 2007 durch die Sensoren TerraSAR-X, COSMO-SkyMed und RADARSAT-2 eröffnete sich ein neues Potential für die Radargrammetrierauswertung (Schwäbisch et al., 2009).

Raggam et al. (2010) demonstrieren hochauflösende satellitengestützte Radargrammetrie mit TerraSAR-X SpotLight und 2015 mit Staring-SpotLight Daten (Gutjahr et al., 2015). Toutin und Chénier (2009) zeigen Radargrammetrie mit Radarsat-2 und Capaldo et al. (2011) sowie Perko et al. (2011) verwenden COSMO-Sky-Med SpotLight Daten.

Laufend werden neue Methoden und Algorithmen entwickelt, adaptiert und verbessert, um die Leistung der Radargrammetrie zu steigern. Die meisten Entwicklungen und Bestrebungen fokussieren sich dabei auf die Korrespondenzanalyse. Einen wichtigen Schritt liefert Hirschmüller (2005) mit seiner Entwicklung des *Semi-Global Matcher* (SGM, siehe Abschnitt 2.2.1.4) ursprünglich für die digitale Stereoanalyse optischer Bilder, der jedoch ebenfalls auf Radardaten erfolgreich angewendet werden kann.

Die dafür notwendige Voraussetzung der Epipolarbedingung erfüllt Gutjahr et al. (2014) in seinem Arbeitsablauf zur radargrammetrischen DOM-Generierung. Dadurch kann der SGM als Stereoalgorithmus angewendet und die Genauigkeit der erstellten DOM im Vergleich zur herkömmlichen affinen *Winner Takes All*-Methode um 41% verbessert werden (Gutjahr et al., 2014).

Die Größenwahl des Referenzfensters beeinflusst die Ergebnisse der Ähnlichkeitsberechnung maßgeblich. Méric et al. (2011) stellen einen vielfenstrigen Ansatz vor, bei dem sie ebenfalls die Epipolarbedingung anwenden und drei Methoden testen: in der ersten Methode werden die Korrelationsprofile mehrerer Fenstergrößen multiplikativ miteinander kombiniert. In der zweiten Methode wird das Referenzfenster in Abhängigkeit der Geländeneigung und Sensorposition skaliert, um durch die geometrische Entzerrung der Hangverkürzung den Referenzausschnitt an den Suchausschnitt anzupassen. In der dritten vorgestellten Methode werden die beiden genannten miteinander kombiniert. Méric et al.

¹Durch die Stereoauswertung der analogen Bilddaten an einem analytischen Auswertegerät wurde eine Höhengenaugkeit von ca. 90 m (SIR-A) bzw. 60 m (SIR-B) erreicht.

versichern die Erreichbarkeit der maximal möglichen Genauigkeit bei einer Kombination der Methoden in den verschiedenen Pyramidenstufen und schlagen die Methode 3 in der ersten und Methode 2 in den weiteren Pyramidenebenen vor.

Nascetti (2013) stellt in ihrer Dissertation eine innovative Strategie für die Korrelationsanalyse hochauflösender Radargrammetrie vor. Der Algorithmus basiert auf einer hierarchischen Lösung mit Epipolarbedingung. Die Korrespondenzen werden mit einem flächenbasierten Kriterium und der Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses entlang zweier senkrechter Suchpfade bestimmt. Die Suche nach homologen Punkten wird direkt im Objektraum durchgeführt, indem die Stereobilder auf ein dreidimensionales Gitter projiziert werden. Dadurch grenzt sich nicht nur der Suchraum ein, sondern die Bilder werden in der gleichen Bodengeometrie abgerufen, was eine einfachere, robustere und zuverlässigere Punktzuordnung ermöglicht. Zur Specklefilterung wird eine dynamische Filtertechnik angewendet und die Ergebnisse mit interferometrisch ausgewerteten Höhenmodellen verglichen. Im flachen Gelände erreicht der entwickelte Stereo-SAR-Algorithmus mit SpotLight- und Stripmap-Daten eine Genauigkeit von besser als 3 m, im bewaldeten Gebiet 4 m.

Gisinger et al. (2015) versprechen durch die Kombination von strenger Linearisierung der Dopplergleichungen mit genauer Sensormodellierung, Berücksichtigung von atmosphärischen Laufzeitverzögerungen, Gezeiten- und plattentektonischen Bewegungen, Satellitendynamiken und geometrischer Kalibrierung eine absolute Objektlokalisierung im Zentimeterbereich.

Basierend auf einer hohen Geolokalisierungsgenauigkeit von TerraSAR-X und auf verfügbaren Höhenmodellen mit mittlerer Auflösung benötigt der neue, direkte Ansatz von Balz et al. (2013) für stereoradargrammetrische Prozessierung weder Bodenkontrollpunkte noch jegliche Vorverarbeitungsschritte wie Speckle-Filterung, Pyramidenlevelberechnungen oder Bildregistrierung. Die Suche nach homologen Punkten wird in den zuvor geokodierten Bildern durchgeführt, wodurch eine simultane Prozessierung mehrerer Bilder und von Bildern unterschiedlicher Orbits möglich ist. Dieser Ansatz erfordert allerdings großen Rechenaufwand und die Implementierung auf leistungsstarken parallelen Prozessoren.

4 Methodik

In der Radargrammetrie ist die Korrespondenzanalyse der wichtigste und aufgrund der geometrischen Eigenschaften der Radarbilder zugleich kritischste Arbeitsschritt. Wie bereits erläutert, erschweren geometrische Verzerrungen in den SAR-Bildern die Korrelationsanalyse der in diesen Bereichen liegenden homologen Punkte, was wiederum zu ungenauer DOM-Rekonstruktion dieser Gebiete führt. Da die Hangverzerrungen abhängig vom jeweiligen Aufnahmewinkel sind, wird auch jedes Bild unterschiedlich stark von diesem Effekt beeinflusst. Bei der Betrachtung zweier Bilder ist daher der Schnittwinkel entscheidend für ihre Ähnlichkeit. Mit steigender Differenz der Aufnahmewinkel beider Bilder vergrößert sich auch die Unähnlichkeit zwischen ihnen. Um die Ergebnisse der Korrespondenzanalyse zu verbessern, ist die Überlegung, die Bilder in einem Vorverarbeitungsschritt einander ähnlicher zu machen, sinnvoll. Dazu werden die Bilder in den folgenden zwei vorgestellten Ansätzen einer Art Skalierung unterzogen, um die geometrische Verzerrung zu kompensieren. Allerdings kann wegen der genannten Gründe ein einzelner Skalierungsfaktor weder auf die gesamte Bildfläche, noch konsequent auf alle Stereopaare gleich angewendet werden. Daher wird im ersten Ansatz, der *Adaption des Referenzfensters*, lediglich der Referenzfensterausschnitt angepasst und skaliert und anschließend mit dem Suchfenster auf Korrelation untersucht. Im zweiten Ansatz, der *DHM-basierte Registrierung* (DHM – digitales Höhenmodell), hingegen wird das gesamte Bild in einem Schritt während der Epipolarrektifizierung nicht linear skaliert.

4.1 Untersuchungsgebiete und Datensätze

Für die Datenprozessierung wurden SAR-Daten des TerraSAR-X-Satelliten verwendet, eine SAR-Satelliten Mission als öffentlich-privater Partnerschaft (*Private-Public Partnership* - PPP) zwischen dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) und Airbus, vormals *European Aeronautic Defence and Space Company* (EADS) Astrium GmbH, für wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen. Der 2007 in seine Umlaufbahn gebrachte Satellit operiert mit einer Bandbreite von 300 MHz im X-Band ($\lambda = 2,5 - 3,75\text{ cm}$; $f = 8 - 12\text{ GHz}$) und liefert multi-modale und hochauflösende SAR-Daten. Der *Science Orbit* liefert präzise Orbitinformationen und verspricht somit die Möglichkeit hochgenauer Sensormodellierung. Für den kommerziellen Vertrieb der Daten ist der Geoinformationsdienstleister Infoterra GmbH, seit 2011 Tochtergesellschaft von Airbus Defence and Space, verantwortlich.

Die Bilddaten wurden im aufsteigendem (*ascending*/ASC) und absteigendem (*descending*/DSC) Orbit sowie mit drei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln aufgenommen, was besonders aus geometrischer Sicht von Bedeutung ist. Denn somit liegen Aufnahmen des gleichen Gebietes aus unterschiedlichen Blickwinkeln vor, was Voraussetzung für die radargrammetrische Stereoauswertung ist.

Bei der Datenauswahl lag der Fokus neben der Verfügbarkeit von geeigneten Referenzdaten auf hochgebirgigem Gelände, da der Effekt der geometrischen Verzerrungen bei Hochgebirgsdaten sehr stark ausgeprägt ist. Zudem wurden zusätzlich Daten flachen Geländes gewählt, um den neuen Ansatz und seinen Effekt besser evaluieren zu können.

4.1.1 Untersuchungsgebiete

Für die Datenprozessierung wurden zwei österreichische Testgebiete ausgewählt:

Burgau:

Die Marktgemeinde Burgau in der Steiermark ist ein ländliches Gebiet mit landwirtschaftlichen sowie bewaldeten Flächen im flachen und leicht hügeligen Gelände mit Geländehöhen im Bereich von 270 bis 445 Metern. Dieses Gebiet wurde ausgewählt, um die DHM-basierte Registrierung besser evaluieren zu können.

Ötztal:

Das Ötztal ist ein Seitental des Inntals in Tirol und zeigt eine hochgebirgige Charakteristik mit Geländehöhen im Bereich von 1270 bis 3820 Metern. In den oberen Lagen dehnen sich Gletscherregionen aus. Die Berghänge sind unterhalb der Baumgrenze mit Wald bedeckt. In den Tälern befinden sich neben landwirtschaftlichen Flächen kleinere Ortschaften. Die Auswahl fiel auf dieses Gebiet, da die radarspezifische geometrische Verzerrung in Daten von gebirgigem Gelände ausgeprägt auftritt und die zu untersuchenden Methoden insbesondere auf diese Eigenschaft eingehen.

4.1.2 Verwendete Datensätze

Generell liegen die Testdaten jeweils als Triplet-Datensätze vom aufsteigenden sowie absteigendem Orbit vor, d.h. als aus drei unter verschiedenen Winkeln aufgenommene Szenen. Die Zuordnung zu den unterschiedlichen Aufnahmewinkeln erfolgt im Weiteren durch die Bezeichnung ASC1, ASC2 und ASC3 für Daten des aufsteigenden bzw. DSC1, DSC2 und DSC3 für Daten des absteigenden Orbits. Sämtliche SAR-Bildprodukte wurden in einer horizontalen Einzel-Polarisation und im *Science-Orbit* aufgenommen.

Burgau:

Die hochauflösenden Staring SpotLight Daten von Burgau liegen als Triplet von *single-look slant-range complex* (SSC) Produkten aus dem Zeitraum von Juli bis November 2014 vor (Tabelle 4.1 oben).

Ötztal:

Vom Ötztal wurden drei SSC Stripmap Szenen vom aufsteigenden sowie vom absteigenden Orbit im Zeitraum November 2008 akquiriert (Tabelle 4.1 unten).

Aus den komplexen SSC-Produkten wurden *multi-look slant-range* Amplitudenbilder generiert, um annähernd quadratische Pixel mit Intensitätswerten zu erhalten.

Tab. 4.1: Metadaten Burgau und Ötztal: Aufnahmedatum, zentraler Betrachtungswinkel sowie zentrale Bodenauflösung in Azimut a und Entfernung r für die Stripmap sowie Staring SpotLight Datentriplets in aufsteigender und absteigender Flugrichtung.

Testdaten	Szene	Aufnahmedatum	Aufnahmewinkel	$a[m]$	$r[m]$
Burgau SSC	ASC1	2014/11/15	22,04°	0,24	1,56
	ASC2	2014/08/02	37,09°	0,24	0,97
	ASC3	2014/08/01	56,90°	0,24	0,70
Burgau SSC	DSC1	2014/10/26	21,45°	0,24	1,60
	DSC2	2014/07/25	36,62°	0,24	0,99
	DSC3	2014/07/26	56,63°	0,24	0,70
Ötztal SSC	ASC1	2008/11/10	31,20°	3,30	2,28
	ASC2	2008/11/15	44,46°	3,30	2,52
	ASC3	2008/11/09	53,91°	3,30	2,18
Ötztal SSC	DSC1	2008/11/18	28,83°	3,30	2,43
	DSC2	2008/11/13	41,11°	3,30	2,69
	DSC3	2008/11/08	51,64°	3,30	2,25

Die Datensätze wurden von Airbus Defence and Space (ehemals Infoterra GmbH) akquiriert. Ferner wurden auch weitere Daten prozessiert, allerdings ist die vorgestellte Auswahl zur Präsentation der getesteten Methoden ausreichend.

4.1.3 Referenzdaten

Burgau

Als Referenzdaten für die Validierung der Ergebnisse aus dem Burgau-Datensatz dient ein digitales Oberflächenmodell aus LiDAR-Daten, die 2006 und 2007 im Auftrag der Landesregierung Steiermark mit zwei Punkten pro Quadratmeter aufgenommen wurden. Das LiDAR-Oberflächenmodell steht als regelmäßiges Raster in der Kartenprojektion UTM 32 Nord und WGS 84 als geodätisches Datum mit ellipsoidischer Höhe in einer geometrischen Auflösung von 1 m zur Verfügung. Die hohe Punktdichte während der Datenakquisition liefert detailreiche Informationen über die Erdoberfläche, Bebauung und Bewaldung.

Selbst Stromleitungen sind in diesem Modell zu erkennen (siehe neben stehende Abbildung 4.1), was für die Validierung der radargrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodelle allerdings unnötig detailliert ist. Die Akquirierung der SAR-Daten fand sieben Jahre später, 2014, statt. In dieser Zeit kann sich die Landschaft durch Bebauung, Abriss von Gebäuden, Waldrodung, Aufforstung und normalen Pflanzenwachstum sehr verändern, wobei die Vegetation am stärksten betroffen ist. Zwar wurden die Waldbestände aus der Validierung ausgeschlossen, allerdings haben Solitäre, d.h. einzelnstehende Bäume außerhalb des Waldes, die nicht von diesem Ausschluss abgedeckt sind, oder neu errichtete bzw. abgerissene Gebäude dennoch ihren Einfluss auf die Statistik. Trotz dessen liegt mit diesem LiDAR-Modell ein geeignetes Referenzmodell vor.

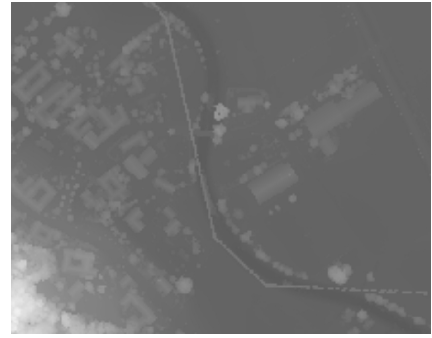


Abb. 4.1: Detailansicht des LiDAR-Modells von Burgau, in der selbst die Stromleitung zu erkennen ist.

Ötztal

Als Referenzdaten für die Ötztal-Daten dient ein aus Last-Pulse Daten einer Laserscannerbefliegung von 2006 generiertes Höhenraster mit einer Auflösung von 1 m. Zwei Jahre später, 2008, wurden die SAR-Bilder akquiriert, womit der zeitliche Abstand und die landschaftliche Veränderung wesentlich geringer sind als bei den Burgau-Daten. Allerdings wurden aus den Last-Pulse Daten nachträglich auch die Gebäude entfernt, so dass lediglich ein Geländemodell vorliegt, d.h. ein digitales Höhenmodell ohne Vegetation und Bebauung. Die Höhenmodelle, die aus Radardaten erstellt werden, sind dagegen Oberflächenmodelle mit Vegetation und Gebäuden. Daher wurde für die Validierung eine Waldmaske erstellt, ein Interessengebiet (*Area of Interest* - AOI), das möglichst alle Waldgebiete im abgebildeten Gebiet abdeckt und von weiteren Berechnungen ausschließt. Diese Maske wurde auf Grundlage eines Orthophotos von 2009 generiert. Aufgrund des Zeitabstandes zwischen den Datenaufnahmen der optischen Bilddaten und der SAR-Daten führen die Veränderungen in der Vegetation dazu, dass diese Waldmaske nicht alle Bäume und Waldränder korrekt erfasst. Die Siedlungen in den Tälern des Ötztalgebietes wurden nicht berücksichtigt. So beeinflussen einzelne Vegetationsbestände und Gebäude die Statistik, wodurch positive Abweichungen zwischen generierten DOM und Referenzmodell plausibel erscheinen.

4.1.4 Simulierte Daten

Für den untersuchten Ansatz 1 wurden aus den vorliegenden ASC1- und ASC2-Bilddaten für das Untersuchungsgebiet Ötztal, dem entsprechenden Sensormodell und dem Höhenraster aus LiDAR-Daten synthetische SAR-Daten in Epipolargeometrie mit 10 m Auflösung simuliert, um die Versuche ohne den problematischen Speckle-Effekt durchführen zu können. Durch die Simulation liegen ungestörte Intensitäten des zurückgestreuten SAR-Signals vor, mit der zunächst in einem *Proof of Concept* getestet werden soll, ob der Algorithmus

generell mit den zu untersuchenden Merkmalen umgehen kann.

Für diese Datensimulation wurden zunächst mithilfe des LiDAR-Höhenmodells und des Sensormodells die lokalen Einfallswinkel für beide Bilder berechnet, in die jeweiligen Bildgeometrie transformiert und grauwertkodiert. Aus diesen wurde die Rückstreuung abgeleitet, indem an den Stellen, wo in der Richtung der Schrägentfernung mehr als ein Pixel aufeinander liegen, die „Intensitäten“ (d.h. die grauwertkodierten Einfallswinkel) addiert und so die Layover-Effekte simuliert werden.

Bei der Generierung dieser Daten haben sich allerdings aufgrund der Berechnung der lokalen Hangneigung und der verwendeten Interpolationsmethode streifenförmige Artefakte eingeschlichen (Abbildung 4.2). Da diese sowohl im Referenz- als auch im Suchbild gleichermaßen auftreten und demnach bei der Korrespondenzanalyse keinen erwiesenen, negativen Einfluss haben, wurden sie nicht weiter behandelt.

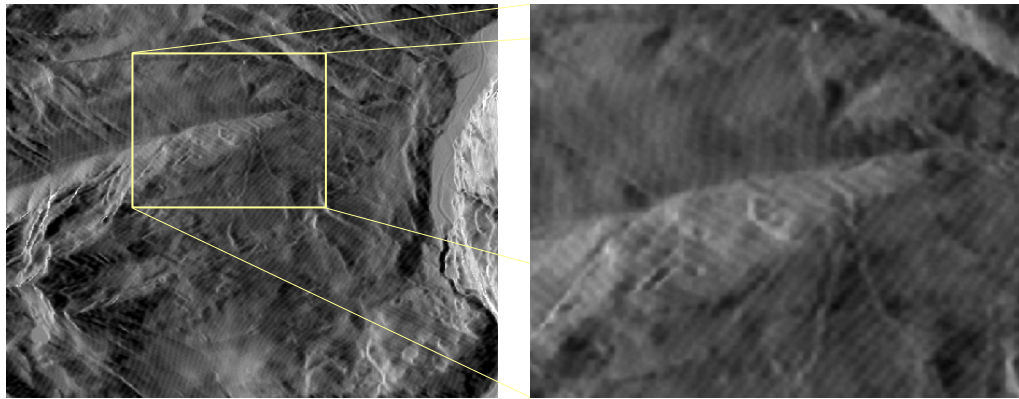


Abb. 4.2: Streifenartige Artefakte in den simulierten SAR-Bildern.

Um die berechneten Disparitäten der ersten Methode validieren zu können, wurde ebenfalls aus dem Höhenmodell der LiDAR-Daten unter Verwendung der Sensormodelle eine Disparitätenkarte abgeleitet. Dazu wird - vereinfacht gesprochen - ein Pixel des ersten simulierten Bildes mithilfe des entsprechenden Sensormodells zunächst auf die Bodenfläche, d.h. in das Objektkoordinatensystem, und anschließend wiederum mithilfe des entsprechenden Sensormodells in das zweite simulierte Bild projiziert. Die Differenzen dieser Pixelpositionen entsprechen der ihrer Disparitäten.

4.2 Ansatz 1: Adaption des Referenzfensters

Dem folgenden Ansatz liegen zwei Überlegungen zu Grunde: zum Einen hat die Wahl der Korrelationsfenstergröße Auswirkung auf die Korrelationswerte und somit auf die Ergebnisse der Ähnlichkeitsberechnung. Daher werden die Ergebnisse unterschiedlicher Fenstergrößen verwendet und miteinander kombiniert, um die Zuverlässigkeit der Korrelation zu erhöhen. Zum Anderen soll die unterschiedliche geometrische Verzerrung in den Bildpaaren durch Skalierung in Entfernungsrichtung kompensiert werden. Die Skalierung wird dabei nicht als eigenständiger Arbeitsschritt auf das gesamte Bild, sondern während der Korrespondenzanalyse lediglich auf das Referenzfenster angewandt, um die Korrelationsfenster einander ähnlicher zumachen.

Beide Herangehensweisen sowie ihre Kombination wurden (nach Méric et al., 2011) umgesetzt und untersucht:

Methode 1: Kombination der Korrelationsprofile.

Methode 2: Adaptive Skalierung.

Methode 3: Kombination der Methoden 1 und 2.

Bei allen drei Varianten wird eine flächenbasierte Korrelationsanalyse mit normalisierter Kreuzkorrelation als Ähnlichkeitsmaß angewendet.

Methode 1: Kombination der Korrelationsprofile

Bei der flächenbasierten Korrelationsanalyse hat die Größenwahl des Korrelationsfensters unterschiedliche Auswirkungen auf die Korrelationswerte. In homogenen Gebieten wird ein großes Fenster benötigt, um nützliche Informationen für die Korrelation zu selektieren. Dagegen reicht in heterogenen Bereichen ein kleineres Korrelationsfenster aus, um Korrespondenzen korrekt zuzuordnen. Um beide Vorteile zu vereinen und Korrespondenzen sowohl in hetero- als auch in homogenen Gebieten herzustellen, werden mehrere Korrelationsfenstergrößen, in diesem Fall drei mit Fenstergrößen von 5x5, 7x7 und 15x15, gewählt und die Ergebnisse anschließend kombiniert.

Dazu wird für jede Fenstergröße der normalisierte Kreuzkorrelationskoeffizient pro Pixel berechnet und ein Korrelationsprofil entlang des Suchbereichs in Entfernungsrichtung erstellt (Abbildung 4.3). Anschließend werden die drei Profile zu einem einzigen Profil sowohl multiplikativ als auch additiv und gewichtet additiv kombiniert. Die Gewichtung erfolgt dabei in Abhängigkeit von der Fenstergröße. Da kleinere Fenster stärkere Ausschläge in den Profilen verursachen, während große Fenster gedämpfte Profile liefern, erhalten die Korrelationswerte von größeren Fenstern die höhere Gewichtung. Dazu wird jeweils ein Faktor berechnet, der abhängig vom Wertebereich der gewählten Fenstergrößen ist, indem die aktuelle Fenstergröße FG ins Verhältnis zur kleinsten Fenstergröße FG_{min} gesetzt wird: $f_{FG} = \frac{FG}{FG_{min}}$. So erhält bei der Kombination der Fenstergrößen die kleinste Fenstergröße immer den Faktor 1 und alle anderen einen höheren Gewichtungsfaktor. Abbildung 4.3 zeigt die Korrelationsprofile der verwendeten Fenstergrößen 5x5, 7x7, 15x15 eines Pixels entlang

des Suchbereiches in Entfernungsrichtung (± 80 Pixel). Die Werte der Korrelationskoeffizienten stellen hier das Ähnlichkeitsmaß dar. Daher definiert die Position des maximalen Korrelationskoeffizienten die Lage des korrespondierenden Pixels, was relativ zum Aufpunkt der Disparität entspricht. Im Falle des Testpixels liegt das Maximum bei $+22$ Pixel in Entfernungsrichtung (schwarze Senkrechte). Negative Korrelationswerte wurden ignoriert. Aufgrund von Korrelationen zu anderen Pixeln sind die Nebenkeulen der einzelnen Profile sehr stark ausgeprägt und es kommt bei der Maximumsuche zu Fehlzuordnung (bei den Fenstergrößen 5 und 7 rund 90 Pixel Abweichung vom wahren Wert). Durch die Kombination der Korrelationsprofile lassen sich hier die Nebenkeulen dämpfen, teilweise sogar eliminieren und die Hauptkeule verstärken, was die korrekte Lokalisierung des Maximums robuster macht. Bei allen drei Korrelationsarten (Addition, gewichtete Addition und Multiplikation) liegt der maximale Wert bei 22 Pixel, also bei der wahren Disparität für das Testpixel. Am besten wird hier die Multiplikation der Werte, da hier das Maximum am eindeutigsten ist.

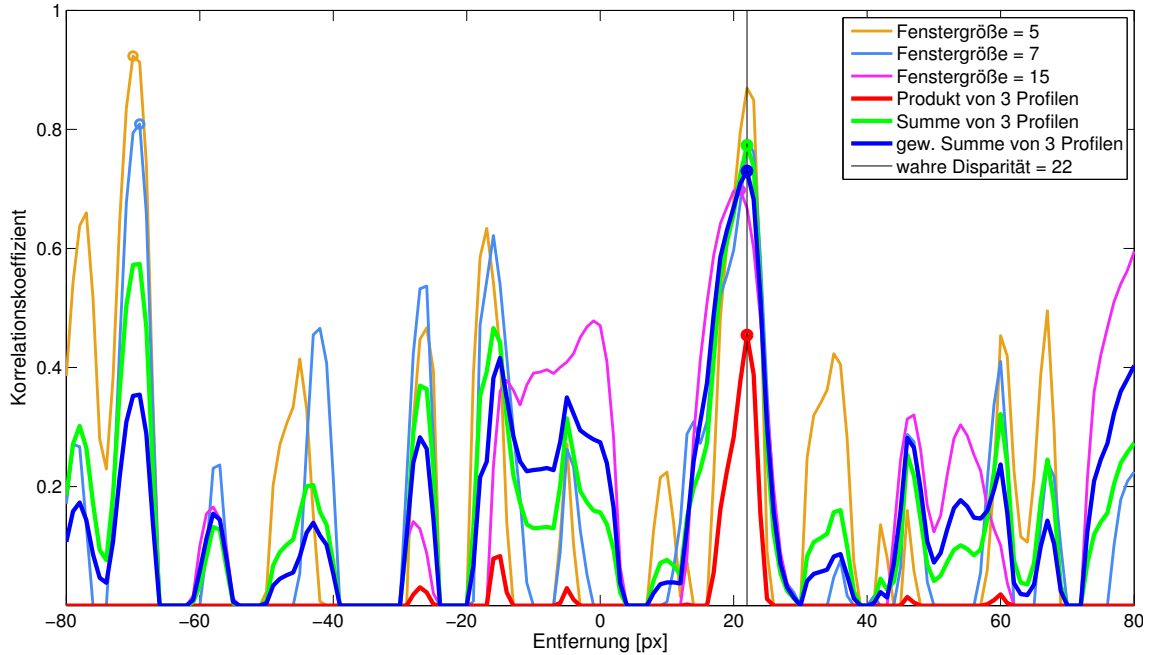


Abb. 4.3: Korrelationsprofile verschiedener Fenstergrößen (5x5, 7x7, 15x15) eines Pixels entlang des Suchbereiches in Entfernungsrichtung (± 80 Pixel). Durch die Kombinationen der Fenstergrößen (additiv (grün), additiv mit Fenstergrößen abhängiger Gewichtung (blau) und multiplikativ (rot)) werden die Nebenkeulen gedämpft und somit die Lokalisierung des Maximums (jeweils eingekreist) robuster.

Umsetzung

Die Korrelationsanalyse wird für jede Fenstergröße (FG) pixelweise durchlaufen und die Korrelationsergebnisse jeweils in einem DSI abgespeichert (Abbildung 4.4). Die erste Dimension des DSI repräsentiert hier die Bildkoordinaten in Entfernungsrichtung, also eine Bildzeile, die zweite Dimension den Such- bzw. Disparitätsbereich. Wird eine Spalte dieses DSI selektiert, stellt diese das Korrelationsprofil dar. Diese drei DSI werden anschließend

additiv, multiplikativ und gewichtet additiv kombiniert und über eine spaltenweise Maximumsuche die Disparität für jedes Pixel bestimmt.

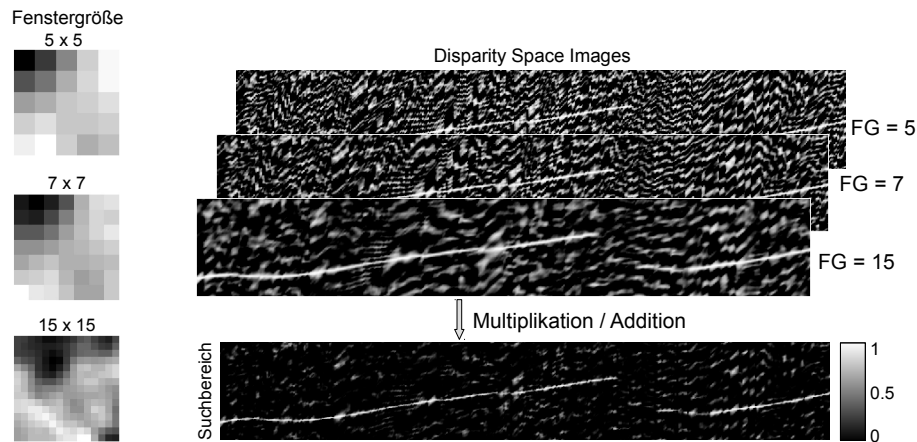


Abb. 4.4: Die Korrelationsergebnisse mit unterschiedlich großen Referenzfenstern (links) werden in DSI gespeichert und anschließend durch Multiplikation bzw. Addition kombiniert (rechts).

Methode 2: Adaptive Skalierung

Bei der folgenden Methode wird das Referenzfenster so skaliert, dass es dem Suchfenster ähnlicher wird. Dabei erfolgt die Skalierung lediglich in Entfernungsrichtung, da nur diese Komponente von der Verzerrung beeinflusst wird. Da keine zuverlässigen Informationen über die Entfernungskompression vorliegen, werden mehrere Skalierungen durchlaufen und während der späteren Maximumsuche der am besten passende Skalierungsfaktor k gewählt. Aus dem Referenzbild wird ein breiterer bzw. schmalerer Ausschnitt als die Fensterbreite gewählt und zur Anpassung an die originale Fenstergröße durch bilineare Interpolation der Grauwerte verkleinert bzw. erweitert (Abbildung 4.5). Dieses skalierte Referenzfenster wird nun mit dem Suchfenster auf Korrelation untersucht.

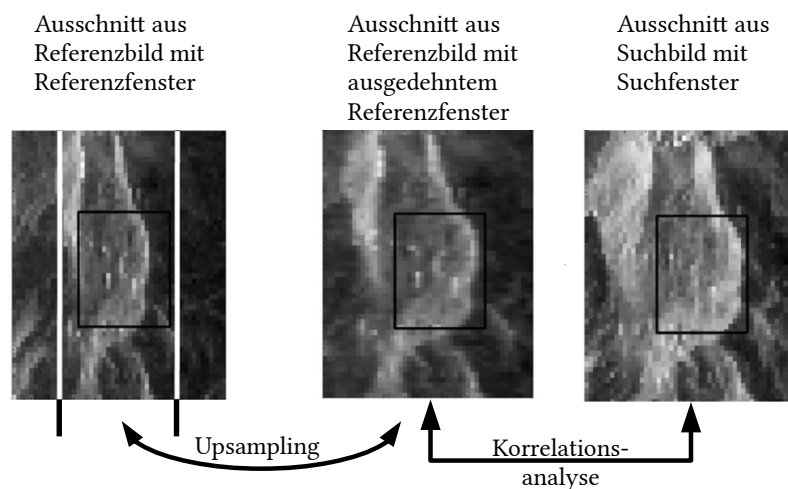


Abb. 4.5: Beispiel der Skalierungsmethode bei Vergrößerung des Referenzfensters (nach Méric et al., 2011).

Umsetzung

Die Ergebnisse der Ähnlichkeitsberechnung unter Verwendung von verschiedenen Skalierungsfaktoren in einem bestimmten möglichen Skalierungsbereich, hier zwischen 0,4 und 1,6 im Abstand von 0,2, werden in einem vierdimensionalen DSI mit dem Skalierungsfaktor k in der vierten Dimension gespeichert. In der anschließenden Maximumsuche wird dann der höchste Korrelationswert pro Pixel aus allen Skalierungen selektiert und somit die Disparität bestimmt. Abbildung 4.6 zeigt die Korrelationsprofile eines Testpixels mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren entlang des Suchbereiches in Entfernungsrichtung. Durch die Maximumsuche wird die Skalierung mit dem höchsten Korrelationswert selektiert. Bei dieser ist somit das skalierte Referenzfenster dem Suchfenster am ähnlichsten. Bei dem Testpixel in Abbildung 4.6 liegt diese bei $k = 1,2$. Drei andere Skalierungsfaktoren führen ebenfalls zur korrekten Disparität (schwarze Senkrechte im Bild), wogegen vier andere Skalierungen zu Fehlzugeordnungen führen.

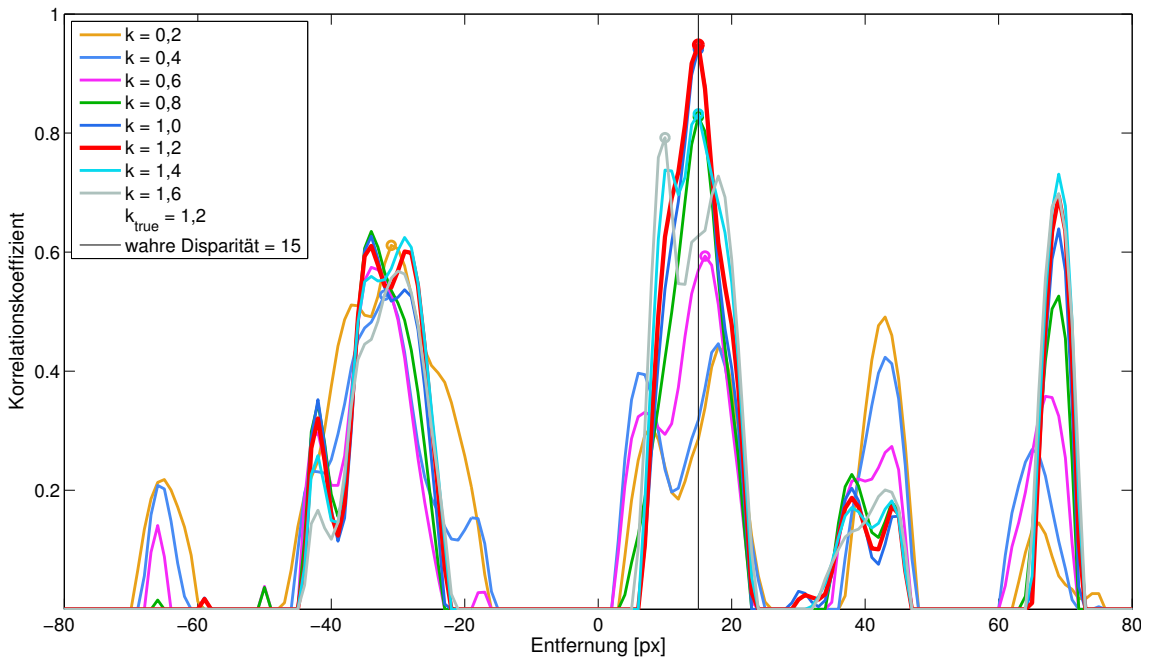


Abb. 4.6: Korrelationsprofile verschiedener Skalierungsfaktoren k des Referenzfensters (Größe 15x15) entlang des Suchbereiches in Entfernungsrichtung (± 80 Pixel). Der wahre Wert für k beträgt hier 1,2, der auch vom Algorithmus als der beste detektiert wurde (rote Kurve). Das Maxima für $k=1,0$ liegt knapp unter dem des $k=1,2$ und wird von dieser Kurve verdeckt.

Methode 3: Kombination der Methoden 1 und 2

Um die Ergebnisse der Korrespondenzanalyse zu verbessern und die Vorteile beider oben beschriebenen Methoden zu nutzen, werden diese in der folgenden Methode miteinander verknüpft. Dazu werden die unterschiedlichen Skalierungen für jeweils eine Fenstergröße durchlaufen und die Korrelationsprofile der jeweiligen Fenstergröße multiplikativ, additiv und gewichtet additiv kombiniert. Über eine Maximumsuche wird die beste Skalierung der kombinierten Fenstergrößen selektiert.

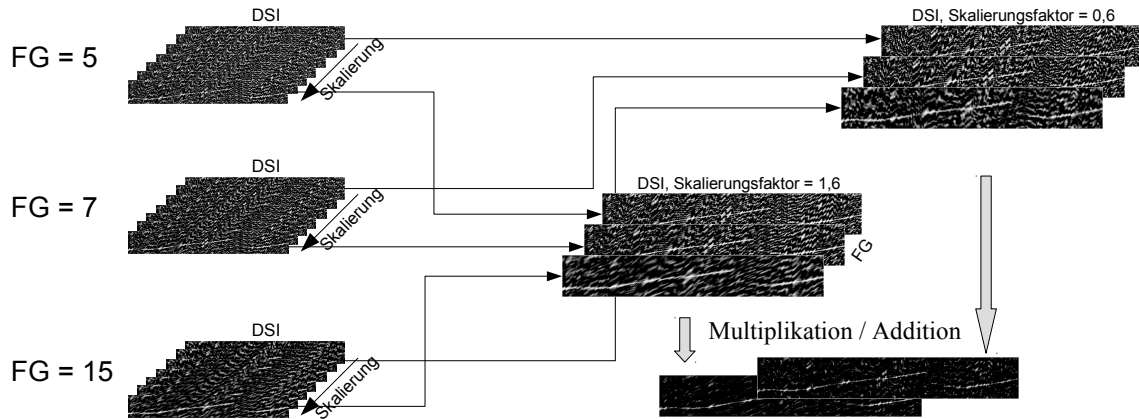


Abb. 4.7: Kombination der Fenstergrößen und Skalierung des Referenzfensters. Die Korrelation wird mit verschiedenen Fenstergrößen (FG) sowie unterschiedlichen Skalierungsfaktoren k durchgeführt und die Ergebnisse in DSI gespeichert. Nach der Addition, gewichteten Addition und Multiplikation dieser DSI wird über eine Maximumsuche die Disparität ermittelt.

Umsetzung

Die Umsetzung dieser Methode ist in Abbildung 4.7 skizziert. Die Korrelation wird für die drei Fenstergrößen 5, 7 und 15 und die Skalierungsfaktoren von 0,4 bis 1,6 durchlaufen und die Ergebnisse in DSI gespeichert. Für jede Skalierung liegt somit ein vierdimensionales DSI mit Fenstergröße als vierte Dimension vor. Die Kombination der Fenstergrößen erfolgt durch Multiplikation bzw. Addition der DSI entlang der dritten Dimension. Die Maximumsuche selektiert den maximalen Korrelationswert pro Pixel aus allen kombinierten Skalierungen. Die Position dieses Maximums in dem entsprechenden DSI repräsentiert die Disparität.

Die Korrelationsprofile werden in den Abbildungen 4.8 für die additive, in 4.9 für die gewichtet additive und in 4.10 für die multiplikative Kombination gezeigt. Alle drei Varianten führen mit der Wahl von $k = 0,8$ zu einer korrekten Punktzuordnung und Disparitätsberechnung. Der wahre Wert für k liegt allerdings bei $k_{true} = 0,4$ (blaue Kurve), der lediglich mit den additiven Methoden zu einer korrekten Zuordnung führt (siehe Detailansichten). Auffällig ist, dass durch die Multiplikation die Nebenkeulen stark gedämpft und oft komplett eliminiert werden. Die Amplitude der Hauptkeule wird erhöht sowie die Flanken steiler. Dadurch ist eine genaue Zuordnung möglich, womit die multiplikative Kombination wesentlich robuster zu sein scheint als die beiden anderen Varianten.

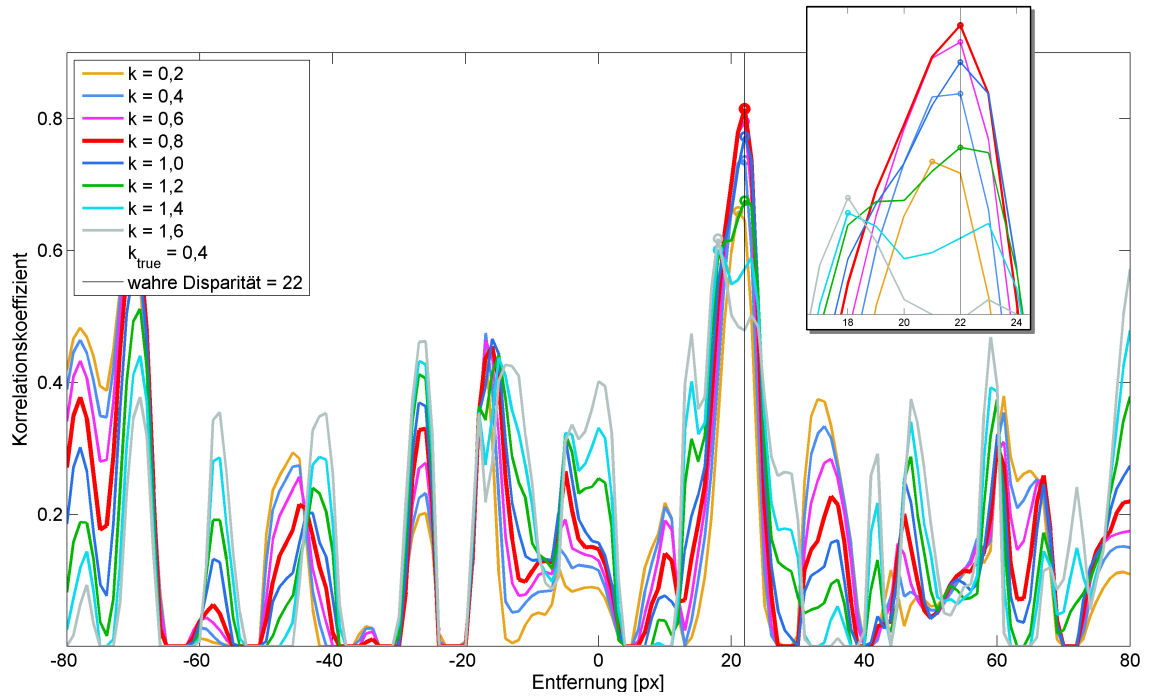


Abb. 4.8: Korrelationsprofile für additive Kombination der Fenstergrößen und Skalierung des Referenzfensters.

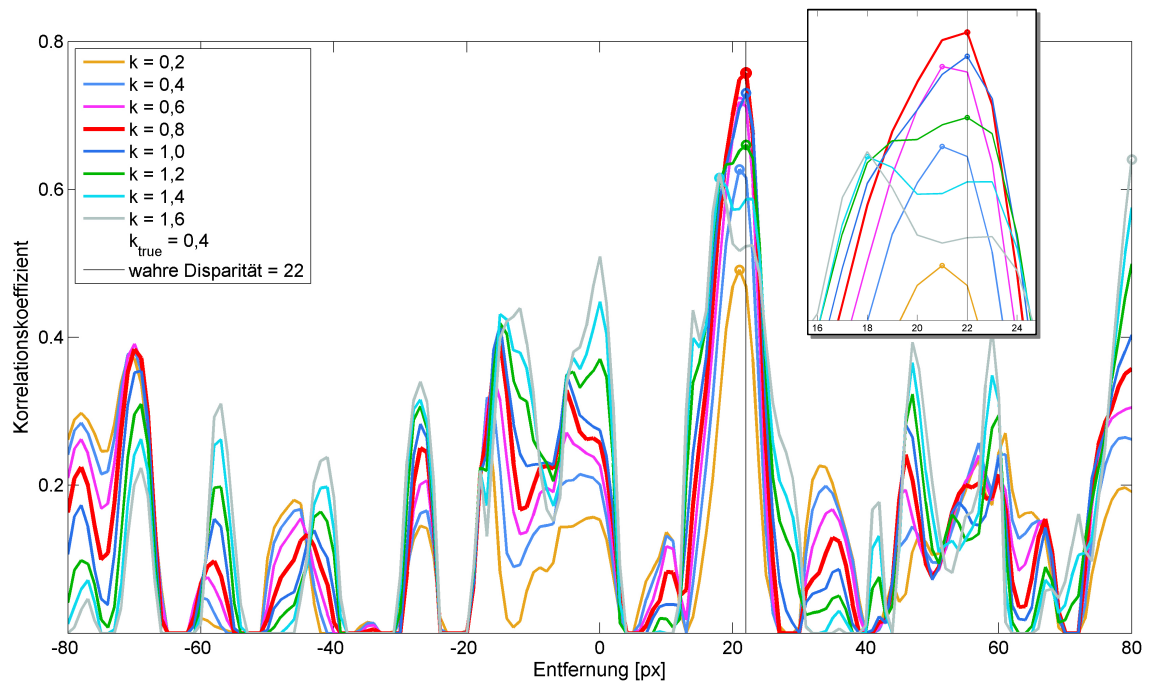


Abb. 4.9: Korrelationsprofile für gewichtet additive Kombination der Fenstergrößen und Skalierung des Referenzfensters.

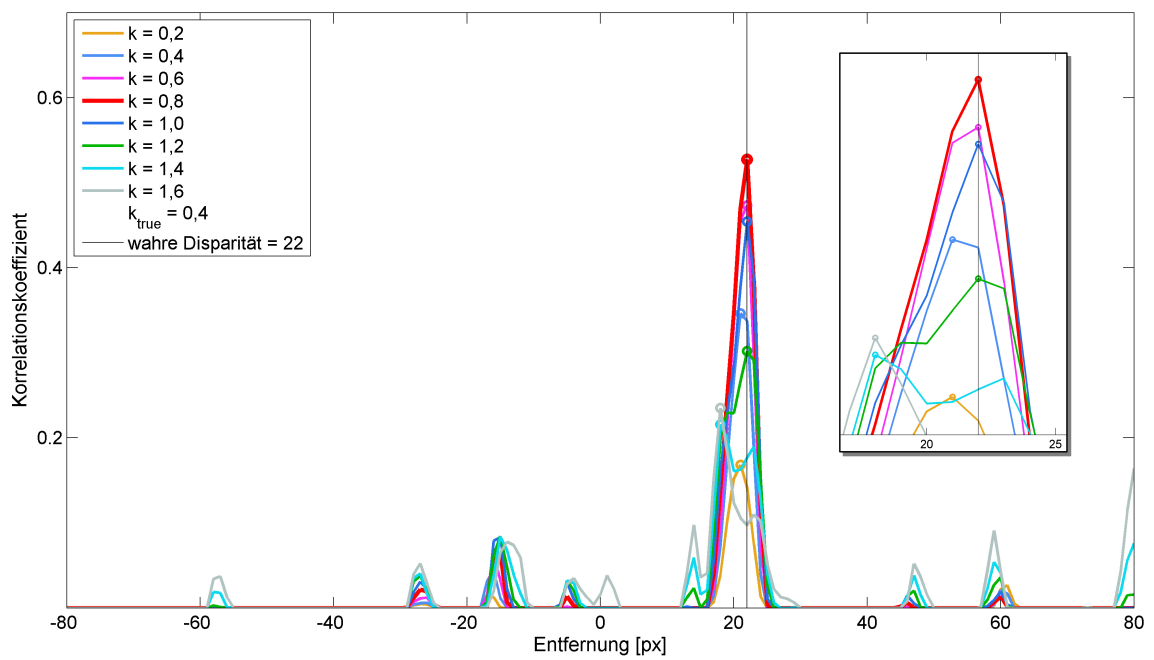


Abb. 4.10: Korrelationsprofile für multiplikative Kombination der Fenstergrößen und Skalierung des Referenzfensters.

4.3 Ansatz 2: DHM-basierte Registrierung

Im folgendem Ansatz wird die unterschiedliche Geometrie beider Bilder genutzt, um eine adaptive Skalierung über die gesamte Bildfläche durchzuführen. Dabei findet diese Skalierung nicht als eigenständiger Arbeitsschritt, sondern während der Epipolarrektifizierung statt. Die einzelnen Bildelemente werden nicht wie bisher auf eine Tangentialebene mit konstanter Höhe projiziert (siehe Abschnitt 2.2.2), sondern auf eine Fläche mit angepassten Höhenwerten aus einem Höhenmodell (Abbildung 4.11). D.h. jedem Bildelement wird ein eigener Höhenwert zugeordnet. Die Voraussetzungen für dieses Verfahren bilden vorhandene grobe Höheninformationen von dem abgebildeten Gebiet. Die beiden epipolar rektifizierten Bilder werden demnach einer speziellen Art der DHM-basierten Geokodierung unterzogen.

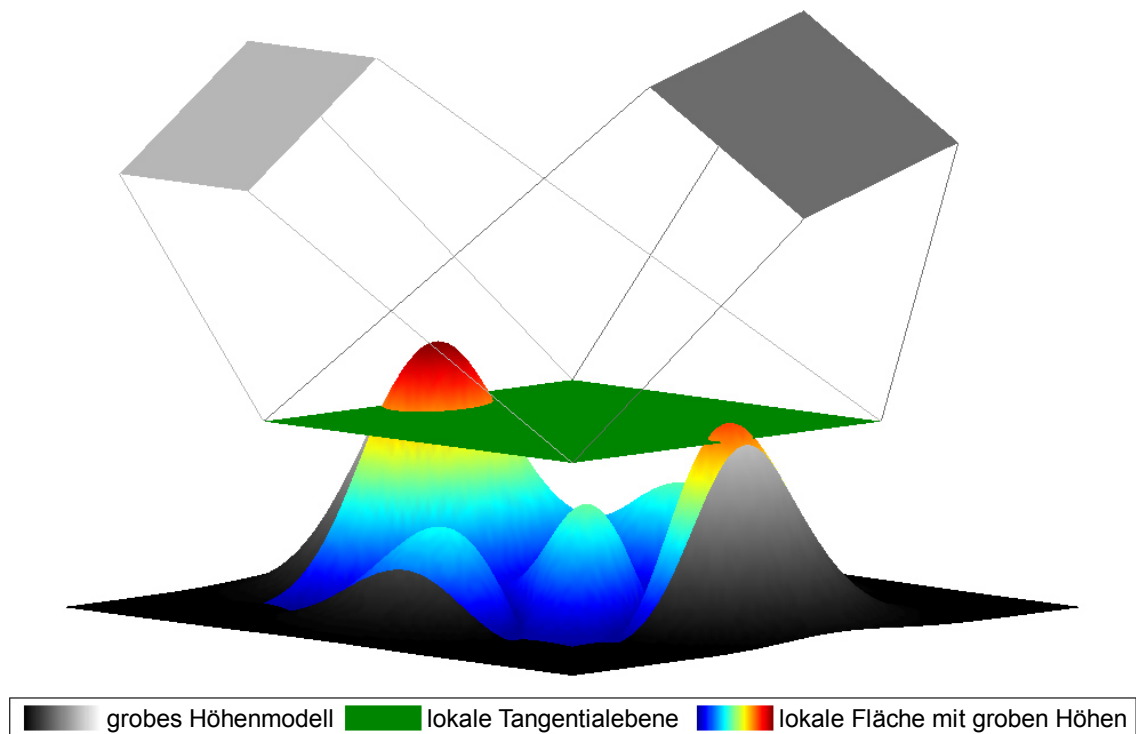


Abb. 4.11: Verschiedene Projektionsebenen bei der Epipolarrektifizierung: Die SAR-Bilder (graue Ebenen) werden nicht wie ursprünglich auf eine Tangentialebene mit konstanter mittlerer Höhe (grüne Ebene) projiziert, sondern auf eine Fläche (farbig) mit pixelweise zugeordneten Höhenwerten aus einem groben Höhenmodell (grauer Farbverlauf).

In der Abbildung 4.12 wird die Auswirkung der beiden unterschiedlichen Epipolarrektifizierungen auf zwei SAR-Bilder demonstriert. Links sind die beiden Ausgangsbilder dargestellt, in denen die Bildinhalte entlang einer Kurve verzerrt sind und homologe Punkte somit nicht auf einer Linie liegen. In der Mitte der Abbildung werden die epipolarrektifizierten Bilder mit Projektion der Bilder auf eine Tangentialebene gezeigt. Hier liegen homologe Punkte auf einer Geraden parallel zur X-Achse, allerdings sind die Berghänge in den so rektifizierten Bildern ASC1 und ASC2 unterschiedlich verzerrt. Rechts sind die epipolarrek-

tifizierten Bilder mit Projektion auf eine Fläche mit Höhen aus einen groben Höhenmodell (hier SRTM-Modell) dargestellt. Die homologen Punkte befinden sich ebenfalls entlang einer Bildzeile. Hier sind die Längsseiten der Berghänge in beiden Bildern ASC1 und ASC2 gleich lang. Da dieser Ansatz quasi einer speziellen Art von DHM-basierten Geokodierung entspricht, sind die Berghänge nicht mehr verzerrt und entsprechen den realen Ausmaßen.

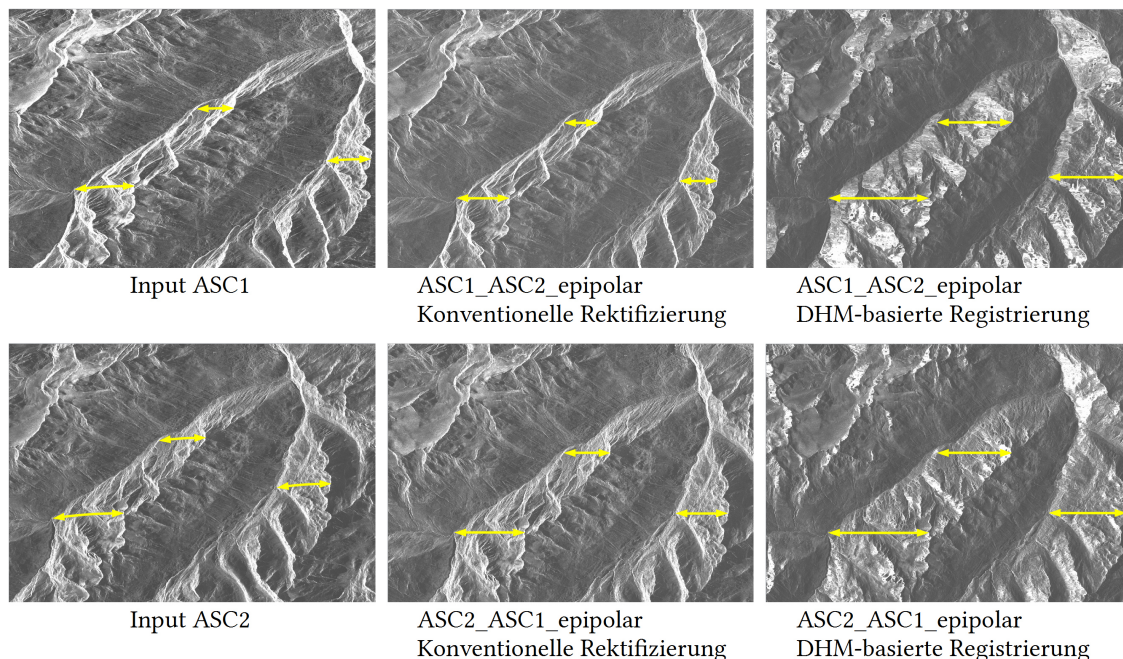


Abb. 4.12: Vergleich der Epipolarrektifizierungen: links Ausschnitte zweier unrektifizierter SAR-Bilder ASC1 (oben) und ASC2 (unten) als Ausgangsdaten, mittig die Ausschnitte nach der konventionellen Rektifizierung und rechts die gleichen Ausschnitte nach der DHM-basierten Registrierung.

Diese so registrierten Epipolarbilder werden der Korrespondenzanalyse unterzogen, die ebenfalls hierarchisch in mehreren Auflösungspyramidenebenen durchgeführt wird. Allerdings werden nun keine Näherungslösungen mehr für das erste Pyramidenlevel benötigt. Die Korrespondenzanalyse ermittelt die Disparitäten aus diesen registrierten Epipolarbildern, die als Restabweichungen zum SRTM-Modell verstanden werden können. Zu den aus diesen Disparitäten abgeleiteten Höhen müssen daher abschließend die Höhenwerte des SRTM-Modells wieder addiert werden. Die weiteren Arbeitsschritte zur DOM-Generierung entsprechen den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen.

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden vorgestellten Ansätze präsentiert und mithilfe der vorhandenen Referenzdaten auf ihre Genauigkeit untersucht. Der erste Ansatz *Adaption des Referenzfensters* wurde in MatLab entwickelt, in dem keine Oberflächenrekonstruktion implementiert ist. Daher können die Ergebnisse des ersten Ansatzes lediglich mit einer Disparitätenkarte und nicht mit einem Höhenmodell verglichen werden. Für den zweiten Ansatz wurden die Daten mit der *Remote Sensing Software Graz* (RSG) vom Joanneum Research prozessiert. Dort ist die Oberflächenrekonstruktion implementiert, so dass die Ergebnisse des zweiten Ansatzes mit Referenzoberflächenmodellen verglichen werden können.

5.1 Ansatz 1: Adaption des Referenzfensters

Der erste Ansatz *Adaption des Referenzfensters* (Abschnitt 4.2) wurde auf den simulierten und epipolarrektifizierten SAR-Daten vom Ötztal angewendet (Abbildung 5.1). Im Hinblick auf die Rechenzeit wurden nicht die kompletten Bilddaten ausgewertet, sondern ein Ausschnitt gewählt, der sowohl dem Sensor zugeneigte sowie vom Sensor abgewandte Bergänge beinhaltet. Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsausschnitt beider epipolarrektifizierten Bilder: ASC1 als Referenz- und ASC2 als Suchbild sowie die Disparitätenkarte, die als Referenz-

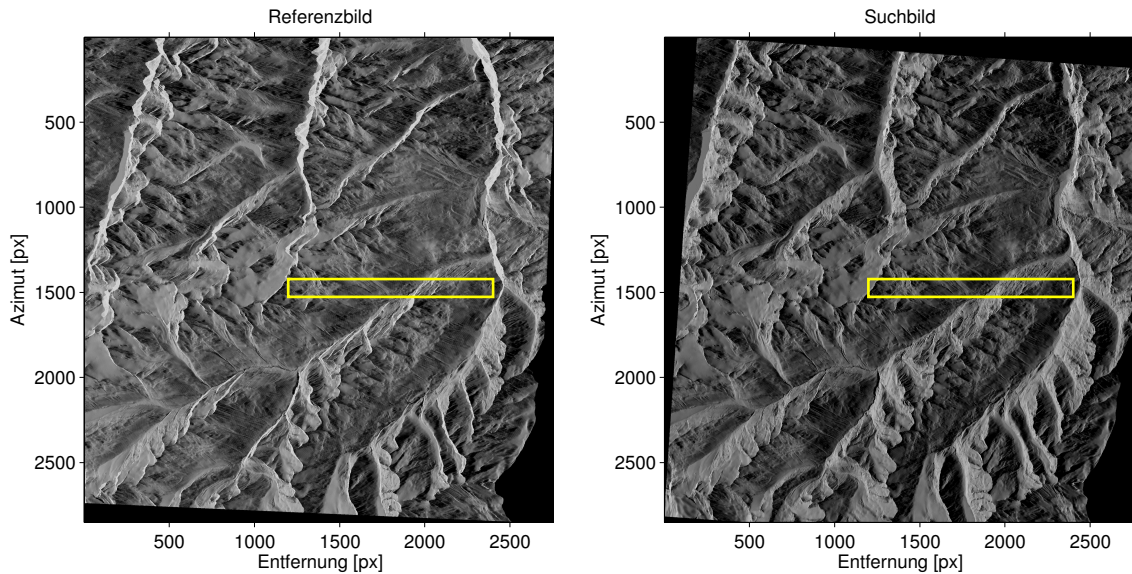


Abb. 5.1: Epipolar rektifiziertes Referenz- und Suchbild des Testgebiets Ötztal mit markierten Ausschnitt für die Implementierung des Ansatzes *Adaption des Referenzfensters*.

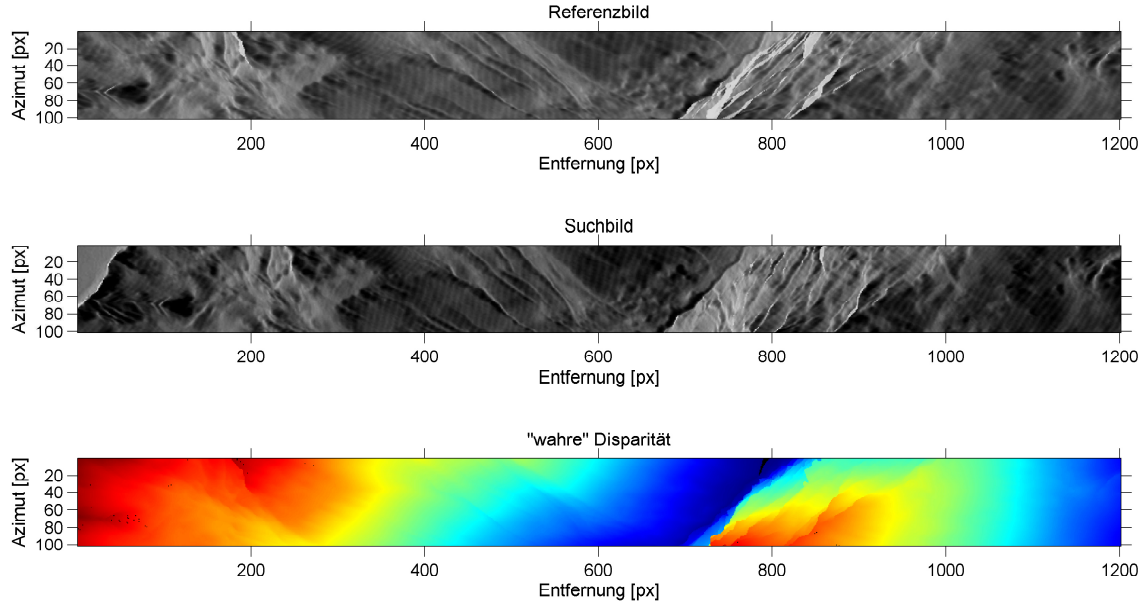


Abb. 5.2: Referenz- und Suchbildausschnitt des Testgebiets Ötztal (oben und Mitte) und die Disparitätenkarte (unten). Die homogen hellgrauen Bereiche v.a. im Referenzbild sind Layoverbereiche im SAR-Bild.

renz für die Genauigkeitsuntersuchung aus LiDAR-Daten abgeleitet wurde. Da in MatLab keine Oberflächenrekonstruktion durchgeführt wurde, liegen lediglich Disparitätenkarten als Ergebnisse der einzelnen Methoden vor (Abbildungen 5.3 bis 5.6). Als Stereoalgorithmus wurde die WTA (*Winner-Take-All*) Methode, d.h. eine einfache Selektion der Disparität über das Maximum des Korrelationswertes, verwendet. Die Layover-Bereiche, die vor allem im Referenzbild als hellgraue Bereiche hervortreten, wurden in den Ergebnissen maskiert und somit als ungültige Bereiche ausgeschlossen.

Da sich die verschiedenen Herangehensweisen unterschiedlich auf die Korrelationskoeffizienten auswirken, konnte kein gemeinsamer Schwellwert als geeignetes Ausreißerkriterium gefunden werden. Um die Methoden subjektiv miteinander vergleichen zu können, sind Mittelwert und Standardabweichung der Ergebnisse zunächst ohne Anwendung eines Schwellwertes in Tabelle 5.1 gegenübergestellt. Anschließend wurden für jede Methode individuelle Schwellwerte aus den statistischen Eigenschaften der Korrelationswerte abgeleitet, da der Mittelwert und die Standardabweichung jeder Methode unterschiedlich sind. Somit wird die Charakteristik der einzelnen Methoden als Kriterium genutzt. Der jeweilige Schwellwert SW_i ergibt sich aus dem Mittelwert $\bar{\rho}_i$ der Korrelationswerte ρ des jeweiligen Stereopaars, subtrahiert um die Standardabweichung σ_i : $SW_i = \bar{\rho}_i - \sigma_i$. Die Ergebnisse unter Verwendung dieser Schwellwerte sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. In beiden Tabellen sind Mittelwert und Standardabweichung in der Maßeinheit *Pixel* (engl. *Picture Element* für Bildelement, Bildpunkt), abgekürzt *px*, angegeben und die besten Werte hervorgehoben.

Das negative Vorzeichen aller Mittelwerte in beiden Tabellen repräsentiert eine systematische Abweichung der errechneten Disparitäten, d.h. die ermittelten Disparitäten sind im Mittel zu gering.

Tab. 5.1: Statistik der Ergebnisse aus dem Ansatz *Adaption des Referenzfensters* ohne Verwendung von Schwellwerten.

Methode	Fenstergröße/ Kombination	Mittelwert [px]	Stdabw [px]	gültige Pixel [%]
Standard	FG = 5	-2,44	18,43	97,46
	FG = 7	-1,64	15,07	97,46
	FG = 15	-0,73	11,09	97,46
Methode 1	Produkt	-0,85	10,95	97,46
	Summe	-0,84	10,98	97,46
	gew. Summe	-0,76	10,61	97,46
Methode 2	FG = 5	-2,83	20,09	97,46
	FG = 7	-2,49	18,75	97,46
	FG = 15	-1,89	16,19	97,46
Methode 3	Produkt	-1,01	11,35	97,46
	Summe	-1,05	11,53	97,46
	gew. Summe	-0,82	10,86	97,46

Die Standardmethode (Abbildung 5.3) wurde weder mit Skalierung noch mit einer Kombination der Korrelationsprofile durchgeführt und dient als Vergleich mit den Methoden des adaptiven Referenzfensters. Wie erwartet, führen kleine Referenzfenster vor allem in homogenen Gebieten zu Fehlsortierungen (Abbildung 5.3 beide oben), während große Fenster in diesen Bereichen gute Korrelationseigenschaften liefern. Die Korrelationsprofile bei der Verwendung von großen Fenstergrößen zeigen allerdings sehr schwach ausgeprägte Maxima, wodurch die Punktzuordnung wenig robust ist. Die Werte in der Tabelle 5.1 (Zeile 1 bis 3) spiegeln diesen visuellen Eindruck wider: je größer das Referenzfenster, desto geringer ist die Standardabweichung und die mittlere Abweichung von der Referenzdisparität (Mittelwert). Dass die Vorteile der unterschiedlichen Fenstergrößen durch eine Kombination vereint werden, tritt in den Ergebnissen der Methode 1 deutlich hervor. Abbildung 5.4 zeigt von oben nach unten die Multiplikation, die Addition sowie die gewichtete Addition der einzelnen DSI und zum Vergleich die „wahre“ Disparität ganz unten. In allen drei Kombinationen treten vor allem in homogenen Bereichen deutlich weniger Ausreißer auf, wobei die gewichtet-additive Methode die wenigsten Ausreißer aufweist. Dies zeigen auch Standardabweichung und Mittelwert in Tabelle 5.1 der Methode 1 (Zeilen 4 bis 6). Beide verbessern sich im Vergleich zur Standardvariante deutlich, wobei die gewichtete Summe die beste Kombination zu sein scheint.

Die Annahme, dass eine Skalierung des Referenzfensters die Effekte der Hangverzerrungen kompensiert und die in Korrelation zu bringenden Fenster einander ähnlicher macht,

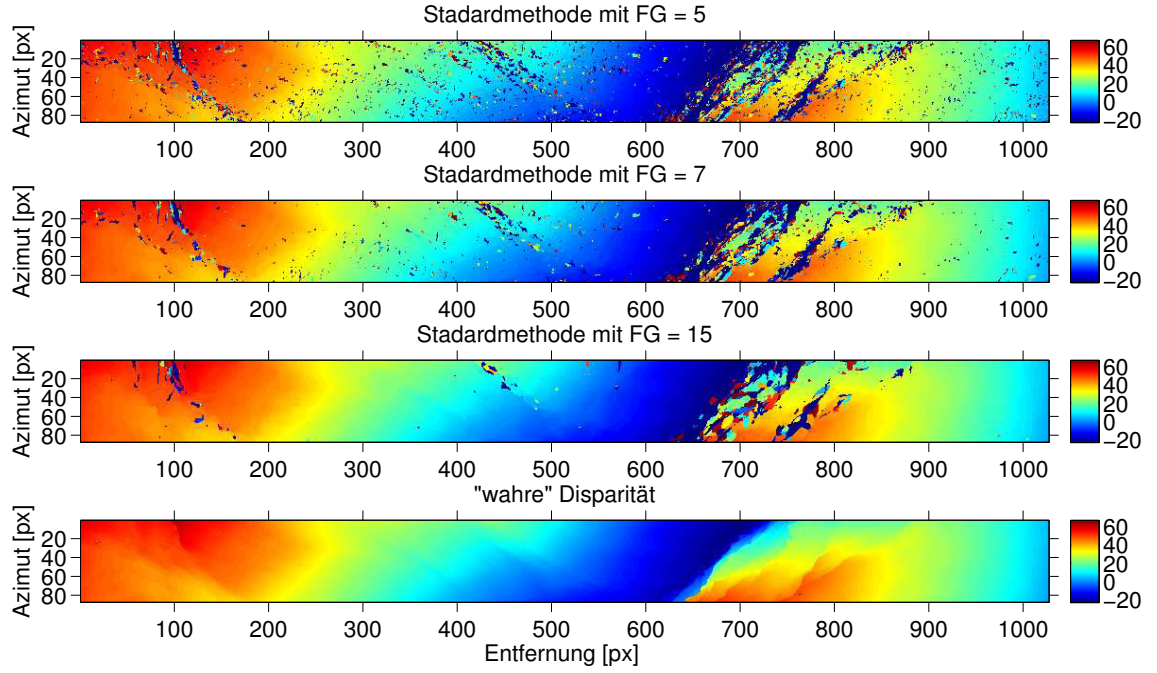


Abb. 5.3: Disparitäten der Standardmethode: keine Skalierung und mit fester Referenzfenstergröße (5x5 oben, 7x7 mittig und 15x15 unten).

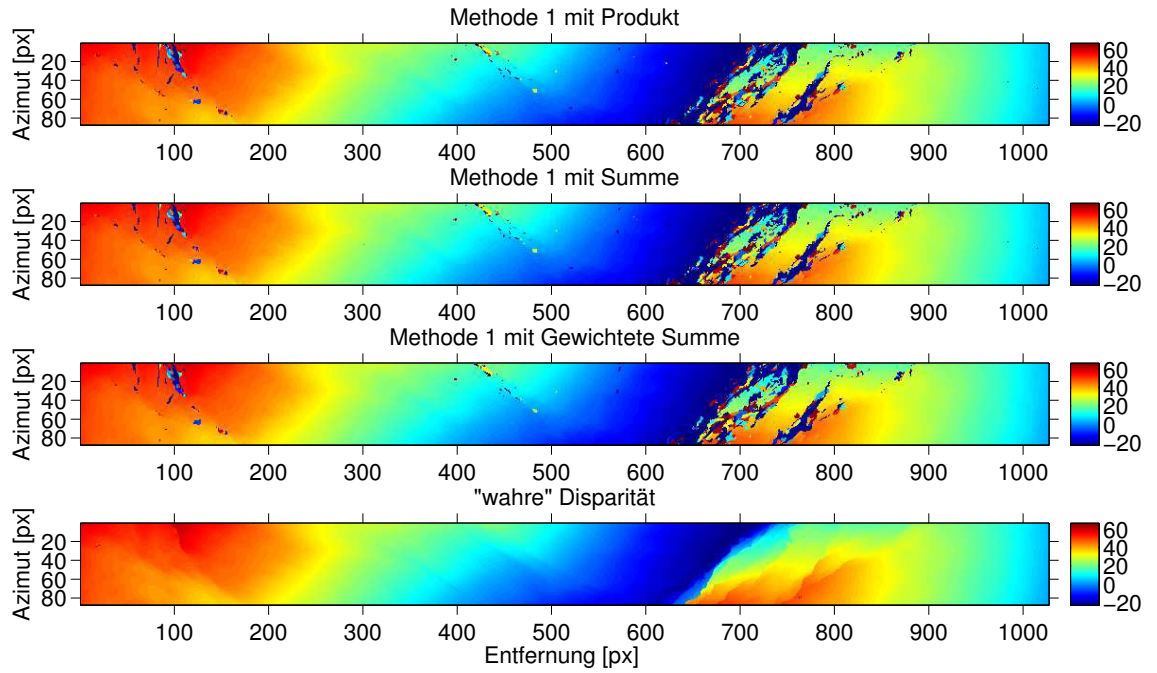


Abb. 5.4: Disparitäten der Methode 1: keine Skalierung und mit Kombination der Korrelationsprofile (Produkt oben, Summe mittig und gewichtete Summe unten).

bestätigt sich in den Ergebnissen der zweiten Methode unerfreulicherweise nicht. In Abbildung 5.5 fallen die Ausreißer in allen drei Disparitätenkarten mit unterschiedlichen Fenstergrößen sofort auf. Auch bei Fenstergröße 15 werden sie nicht signifikant weniger. Die statistischen Werte in Tabelle 5.1 (Zeile 7 bis 9) bestätigen die visuelle Annahme, dass es

auch im Vergleich zur Standardmethode bei allen drei verwendeten Fenstergrößen zu einer Verschlechterung der Werte kommt.

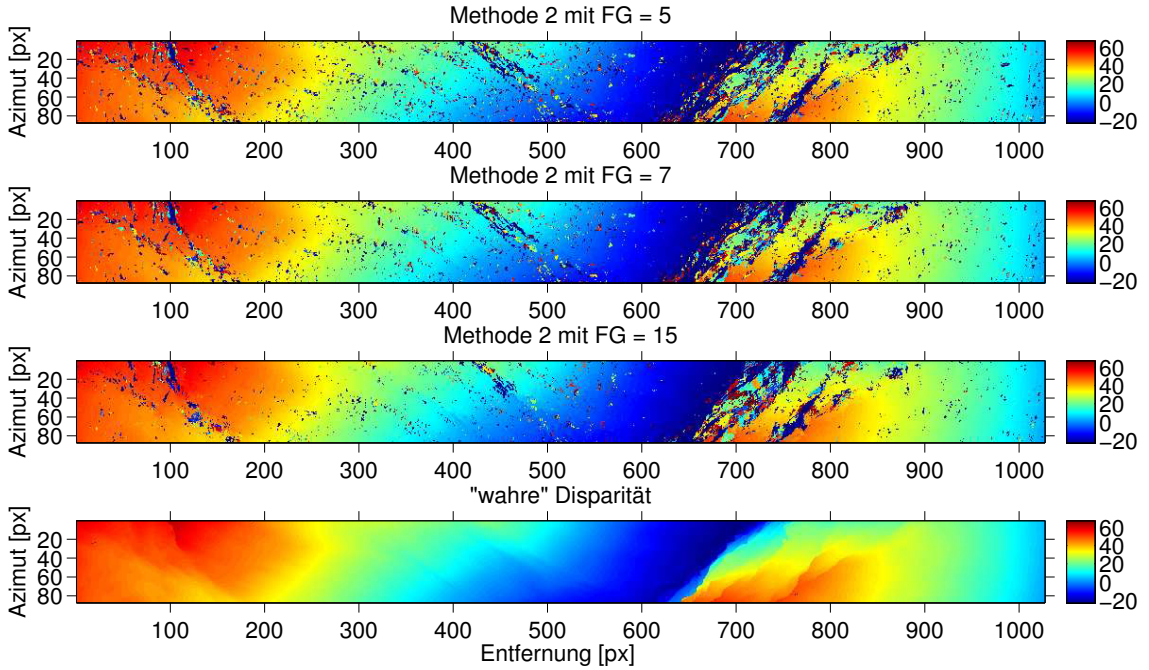


Abb. 5.5: Disparitäten der Methode 2: mit Skalierung und mit fester Referenzfenstergröße (5x5 oben, 7x7 mittig und 15x15 unten).

Werden beide Methoden miteinander kombiniert, beeinflussen sich zugleich die oben beschriebenen Effekte und die Auswirkungen auf die Ergebnisse gegenseitig. In Abbildung 5.6 ist in den Disparitätenkarten der Methode 3 auf den ersten Blick ein relativ glatter Verlauf ohne viele Ausreißer zu erkennen, ähnlich wie in Abbildung 5.4. Andererseits finden sich mehr Ausreißer als bei Methode 2. Somit hat die Kombination der Korrelationsfenster einen positiven Einfluss auf die Ergebnisse, während die Skalierung eine Verschlechterung verursacht. Die dritte Methode vereint beide Methoden, so dass auch die Auswirkungen auf die Genauigkeiten vereint werden. Tabelle 5.1 spiegelt dies in den statistischen Kennzahlen wider. Sie sind etwas schlechter als die Werte der Methode 1, jedoch wesentlich besser als die Werte der zweiten Methode. Die gewichtete Addition als Kombinationsvariante zeigt hier ebenso die besten Werte. Im Vergleich zur Standardmethode mit Fenstergröße 15 ist eine geringe Verbesserung zu erkennen.

Werden während der Korrespondenzanalyse Schwellwerte für das Ähnlichkeitsmaß angewendet, führt dies bei Unterschreitung zu Punktverwerfungen. In den Disparitätenkarten erscheinen an diesen Stellen Lücken. Bei Untersuchung der statistischen Kennzahlen (Tabelle 5.2) ist eine starke Reduzierung der Standardabweichungen und Mittelwerte zu erkennen. Beim Vergleich der Methoden 1 - 3 lassen sich die gleichen, wie oben beschriebenen Schlussfolgerungen ziehen. Allerdings zeigt hier die multiplikative Kombination die beste Performance gegenüber den additiven Varianten. Ihr strengerer Schwellwert für die Korrelationswerte führt auch zur stärkeren Eliminierung von Punktzusordnungen. Da die

Abbildungen dieser Diparitätenkarten denen ohne Schwellwertanwendung sehr ähneln, sind sie nicht an dieser Stelle, sondern im Anhang A.2 aufgeführt.

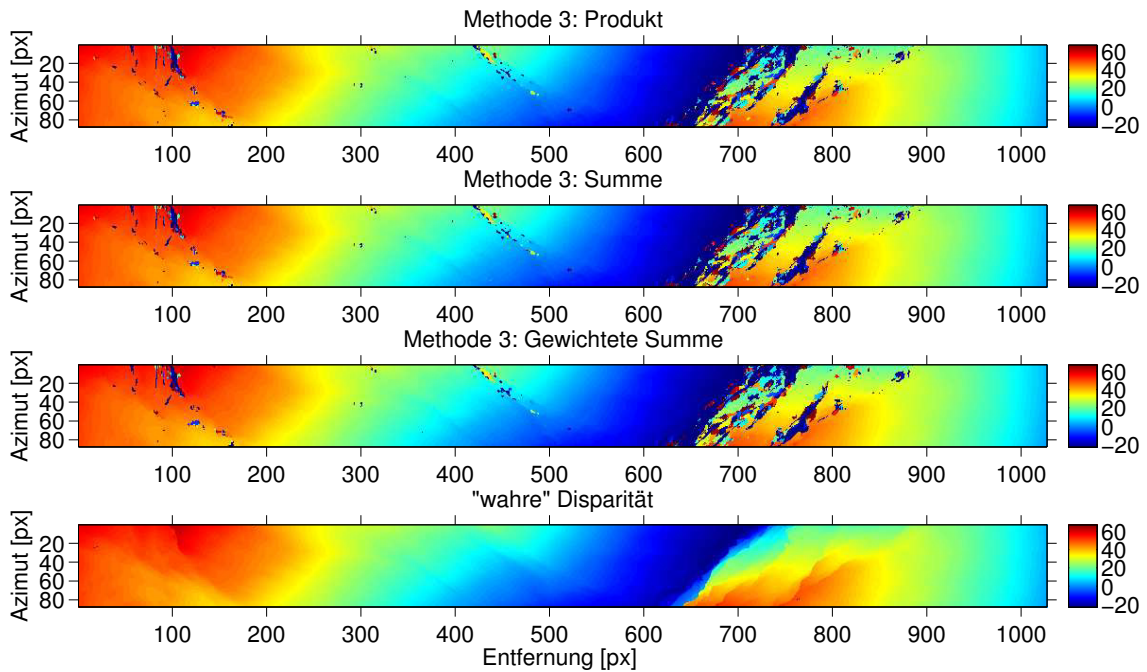


Abb. 5.6: Disparitäten der Methode 3: mit Skalierung und mit Kombination der Korrelationsprofile (Produkt oben, Summe mittig und gewichtete Summe unten).

Tab. 5.2: Statistik der Ergebnisse aus dem Ansatz *Adaption des Referenzfensters* mit Verwendung von Schwellwerten für den Korrelationskoeffizienten.

Methode	Fenstergröße/ Kombination	Mittelwert [px]	Stdabw [px]	gültige Pixel [%]	Schwellwert
Standard	FG = 5	-1,39	13,75	80,94	0,91
	FG = 7	-0,64	8,87	82,97	0,89
	FG = 15	-0,12	3,76	82,34	0,80
Methode 1	Produkt	-0,03	2,17	81,09	0,64
	Summe	-0,07	2,94	84,10	0,84
	gew. Summe	-0,04	2,61	84,02	0,82
Methode 2	FG = 5	-1,70	15,38	79,53	0,92
	FG = 7	-1,09	12,08	82,14	0,89
	FG = 15	-0,29	5,87	78,26	0,78
Methode 3	Produkt	-0,03	2,56	81,32	0,69
	Summe	-0,07	3,27	83,59	0,87
	gew. Summe	-0,05	2,87	83,63	0,85

5.1.1 Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse des ersten Ansatzes lassen folgende Vergleiche zu: zum Einen werden bei der ersten Methode die Kombinationsmöglichkeiten *Multiplikation*, *Addition* und *gewichtete Addition* einander gegenübergestellt. Zum Anderen können die beiden Methoden 1 und 2, also die *Kombination der Korrelationsprofile* und die *Skalierung des Referenzfensters*, auf ihre Vor- und Nachteile untersucht werden.

Da keine Höhenrekonstruktion durchgeführt wurde und die Methoden nicht mit einem Höhenmodell verglichen werden können, lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen lediglich auf Grundlage der Referenzdisparitätenkarte ziehen.

Kombination der Korrelationsprofile

Die visuelle Untersuchung sowie die statistischen Werte zeigen eine Verbesserung der Ergebnisse, wenn verschieden große Referenzfenster verwendet und die Korrelationsprofile miteinander kombiniert werden. Im Allgemeinen führt die Multiplikation der Korrelationsprofile zu einer starken Schwächung bis hin zu einer vollständigen Unterdrückung der Nebenkeulen und einer Verstärkung der Hauptkeule(n), wodurch diese Kombination sehr robust ist. Liegen die Keulen in den drei verwendeten Profilen ungünstig, werden die Nebenkeulen allerdings verstärkt und die Hauptkeulen gedämpft. Dies führt zu Fehlzugeisungen, welche allerdings mithilfe eines Schwellwertes sehr effektiv detektiert und eliminiert werden.

Eine Addition der Korrelationswerte wirkt sich in den Profilen nach dem Superpositionsprinzip aus. Durch die Summe werden die Nebenkeulen nicht ausreichend geschwächt, wodurch es zu Fehlzugeisungen kommt. Diese lassen sich jedoch auch durch einen Schwellwert nicht detektieren. Dagegen können die Hauptkeulen so gedämpft werden, dass unter Anwendung eines Schwellwertes auch korrekt zugeordnete Punkte verworfen werden.

Die geringen Unterschiede in den statistischen Werten zeigen, dass alle drei Kombinationsarten in etwa gleich gut sind. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Kombination der Korrelationsprofile immer eine Verbesserung der Ergebnisse mit sich bringt.

Skalierung

Bei der Skalierung der Fenstergröße wird die erwartete Verbesserung nicht erreicht. Es wurde angenommen, dass Referenz- und Suchfenster bei korrekter Skalierung einander ähnlicher werden und der Effekt der Hangverzerrungen damit kompensiert wird. Wenn mehrere Skalierungen durchlaufen und anhand der Korrelationswerte die beste gewählt wird, sollten die Skalierungsfaktoren mit der Topographie des Geländes korrelieren. In Abbildung 5.7 sind die Skalierungsfaktoren k für den berechneten Ausschnitt bei Verwendung einer Korrelationsfenstergröße von 15x15 visualisiert. Der Ausschnitt oben zeigt die vom Algorithmus gewählten Faktoren und in der Mitte die „wahren“ Skalierungsfaktoren k_{true} innerhalb eines 15x15 großen Fensters. Die „wahren“ Skalierungsfaktoren k_{true} wur-

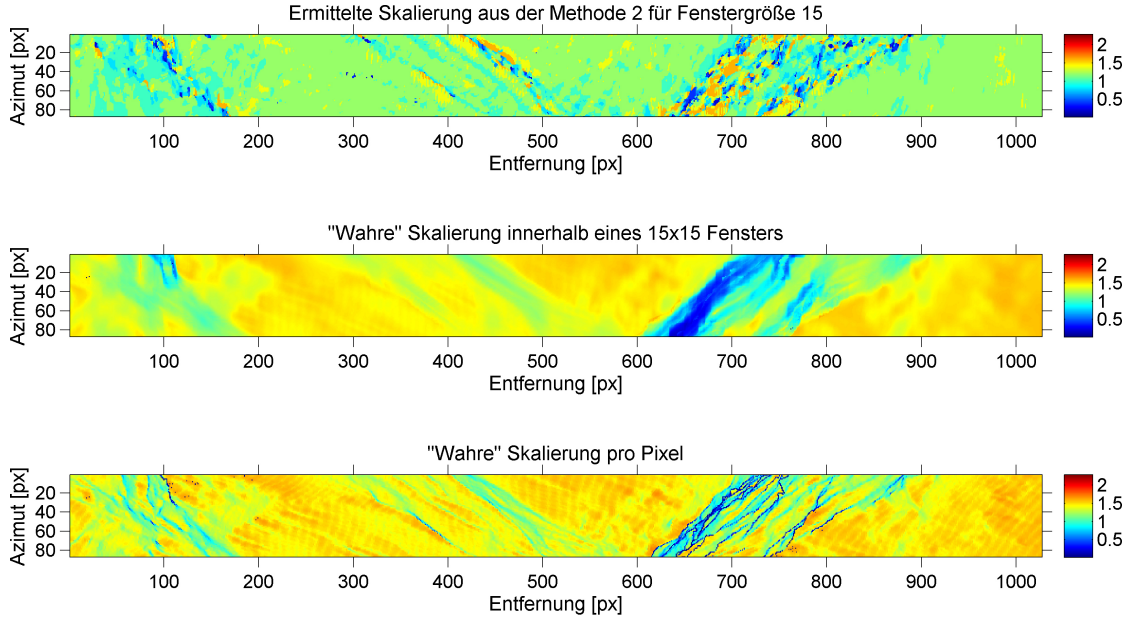


Abb. 5.7: Skalierungsfaktor der Methode 2. Oben der aus der Korrelationsanalyse ermittelte Faktor, mittig der aus der lokalen Auflösungskarte beider Bilder berechnete Faktor innerhalb eines Fensters mit der Größe 15x15, unten der auf gleiche Art berechnete Faktor pro Pixel.

den aus den lokalen Bodenauflösungen der epipolarrektifizierten Eingangsdaten abgeleitet, indem diese miteinander ins Verhältnis gesetzt wurden. Das Ergebnis lieferte jeweils einen Verhältniswert pro Pixel, der in Anwendung der Korrelationsanalyse als Skalierungsfaktor k_{true} verstanden werden kann. Dieser ist in Abbildung 5.7 unten für den verwendeten Geländeausschnitt visualisiert. In flachen beziehungsweise monoton ansteigenden Gebieten ist k_{true} sehr homogen. Bei kuppertem Gelände sind die geometrischen Verzerrungen innerhalb kleiner Regionen allerdings so unterschiedlich stark ausgeprägt, dass auch k_{true} dort stark variiert. Innerhalb des Referenzfensters ist k_{true} folglich oft heterogen, was in der Abbildung 5.7 unten erkennbar ist.

Bei der Korrelationsanalyse mit Skalierung wird der Skalierungsfaktor k homogen für das gesamte Referenzfenster gewählt, indem die Faktoren unterhalb des Fensters gemittelt werden. In homogenen oder monoton steigenden Gebieten hat diese Mittelbildung keine negative Auswirkung, da k hier weiträumig konstant ist. Bei kuppertem Gelände dagegen werden die Bereiche innerhalb des Fensters unterschiedlich stark verzerrt. Wird nun ein einheitlicher Faktor für das gesamte Referenzfenster gewählt, wird dieser Effekt nicht erfasst. Dies führt in diesen Bereichen zu einer falschen „Entzerrung“ und somit auch zu einer Einbeziehung von falsch verzerrten Pixeln in die Korrespondenzanalyse.

Da die Korrelation über das gesamte Referenzfenster durchgeführt wird, werden in diese Berechnung folglich falsche Bildmerkmale einbezogen, die mit ihren Grauwerten einen abweichenden Korrelationswert und somit fehlplatzierte Maxima liefern. Im oberen Abschnitt der Abbildung 5.7 ist in den vom Algorithmus gewählten Skalierungsfaktoren eine schwache Korrelation mit den Geländekonturen zu erkennen. In kuppertem Gelände (zwischen

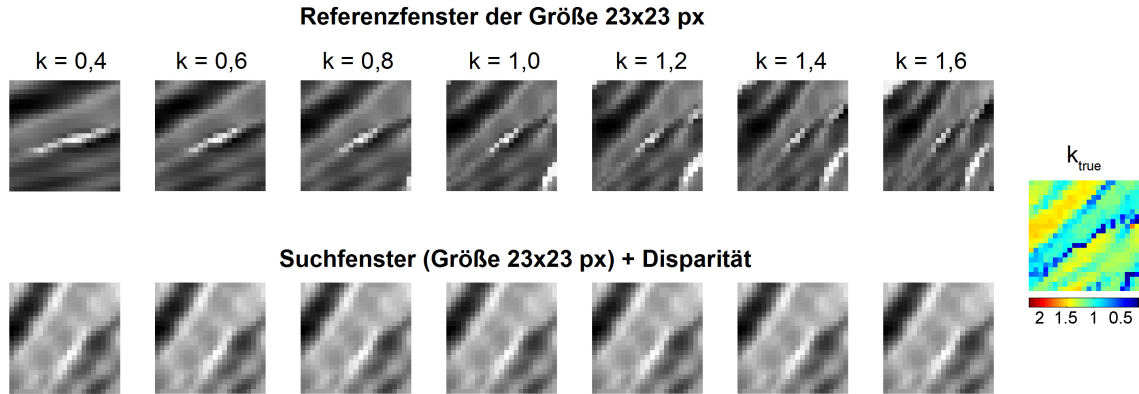


Abb. 5.8: Mit unterschiedlichen Faktoren skalierte Referenzfenster (oben), das entsprechende Suchfenster um ihre Disparität versetzt (unten) und die Skalierung pro Pixel (rechts). Der vom Algorithmus gewählte Faktor liegt hier bei 0,8 und der wahre Faktor bei 1,1.

Entfernung 650 bis 850 px) versagte der Algorithmus und wählte wegen der genannten Gründen falsche Skalierungsfaktoren. Im Vergleich zu den „wahren“ Skalierungsfaktoren sind die vom Algorithmus ausgewählten Werte mehrheitlich zu gering. Es wurde also systematisch ein zu kleiner Skalierungsfaktor gewählt. Werden zu niedrige Skalierungswerte gewählt, wird der Referenzfensterausschnitt zu klein ausgeschnitten und anschließend durch die Skalierung gestreckt. Abbildung 5.8 zeigt die unterschiedlich skalierten Referenzfenster. Mit zunehmendem Faktor erfährt der Bildinhalt des Referenzfensters eine Stauchung in Entfernungsrichtung (oben). Darunter ist das passende Suchfenster zur besseren Visualisierung mehrmals nebeneinander abgebildet. Der Algorithmus wählte bei diesem Beispiel den Faktor $k = 0,8$, während der aus den lokalen Bodenauflösungen berechnete Skalierungsfaktor bei 1,1 liegt. Ein Betrachter würde bei einem visuellen Vergleich einen Faktor von 1,4 wählen, da hier die Verläufe der Bildmerkmale am besten zu passen scheinen.

Der Algorithmus vergleicht die Intensitäten, also die Grauwerte von Referenz- und Suchbild, und nicht die Bildmerkmale miteinander. Daher kann bei falscher Skalierung bei einem Grauwertvergleich der hohe Korrelationskoeffizient zu einer Fehlzuzuweisung führen. Rechts in der Abbildung ist der wahre Skalierungsfaktor innerhalb des Referenzfensters dargestellt, der in diesem Fenster stark variiert.

Die Korrespondenzanalyse wurde zu Analysezwecken ebenfalls mit dem wahren Skalierungsfaktor und verschiedenen Fenstergrößen durchgeführt. Die Ergebnisse sind als Disparitätenkarte in Abbildung 5.9 für die Methode 2 und in Abbildung 5.10 für die Methode 3 dargestellt. Hier bestätigen sich die aufgeführten Schlussfolgerungen, dass die Mittlung des Skalierungsfaktor innerhalb des Korrelationsfensters in kupiertem Gelände zu Fehlzuzuweisungen führt. Die Kombination der Korrelationsprofile bringt hier ebenso die gleichen Verbesserungen wie in den oben vorgestellten Varianten. Die Tabelle 5.3 stellt Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisdifferenzen mit und ohne Schwellwerte gegenüber.

Die Ergebnisse mit Anwendung des Schwellwertes sind in Abbildung 5.11 für Methode

2 und in Abbildung 5.12 für Methode 3 visualisiert, in denen die große Anzahl der eliminierten Fehlzugeweisungen hervorsteht (schwarze Bereiche).

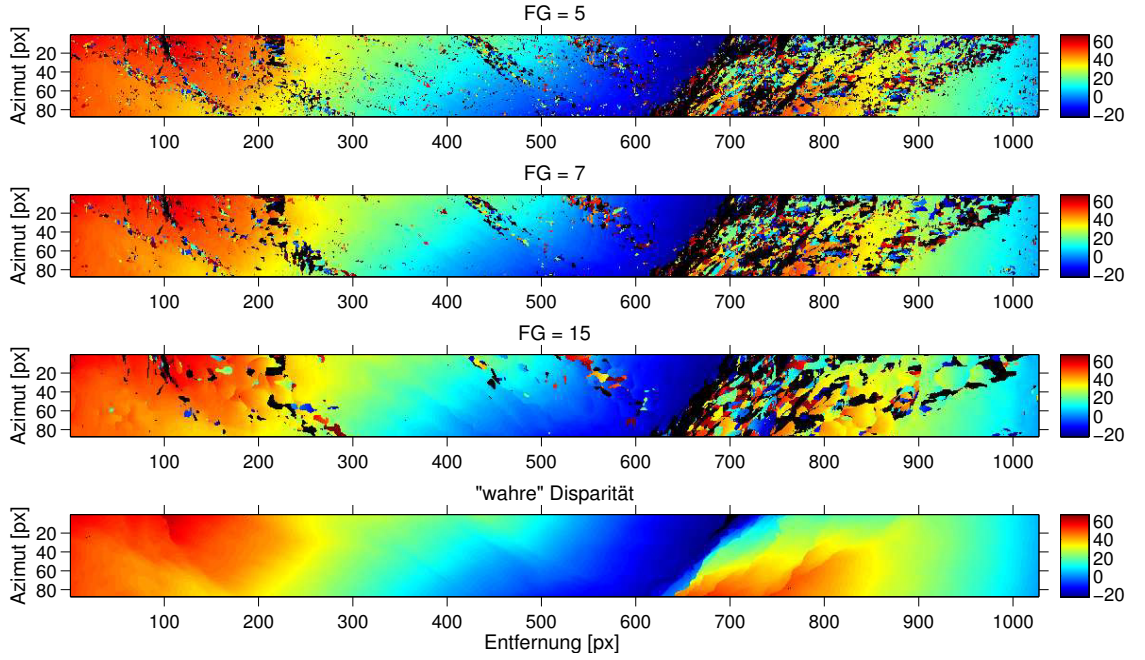


Abb. 5.9: Disparitäten der Berechnung mit dem wahren Skalierungsfaktor und mit fester Referenzfenstergröße (5x5 oben, 7x7 mittig und 15x15 unten). Die schwarzen Bereiche sind die eliminierten Pixel in Layover-Regionen.

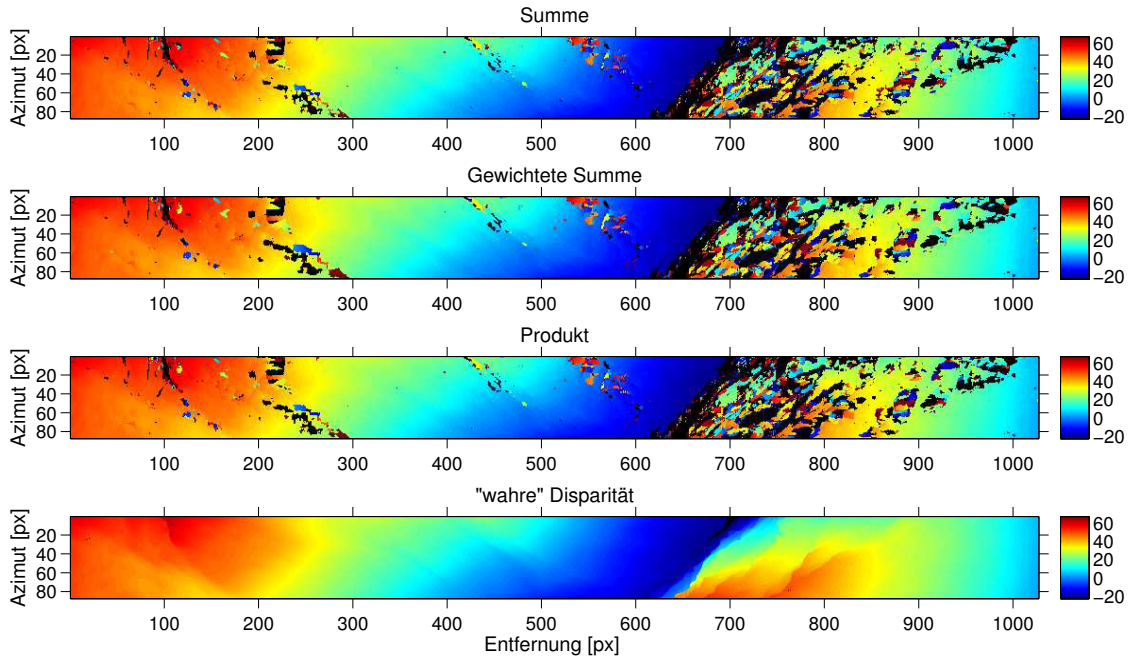


Abb. 5.10: Disparitäten der Berechnung mit dem wahren Skalierungsfaktor und mit Kombination der Korrelationsprofile. Die schwarzen Bereiche sind die eliminierten Pixel in Layover-Regionen.

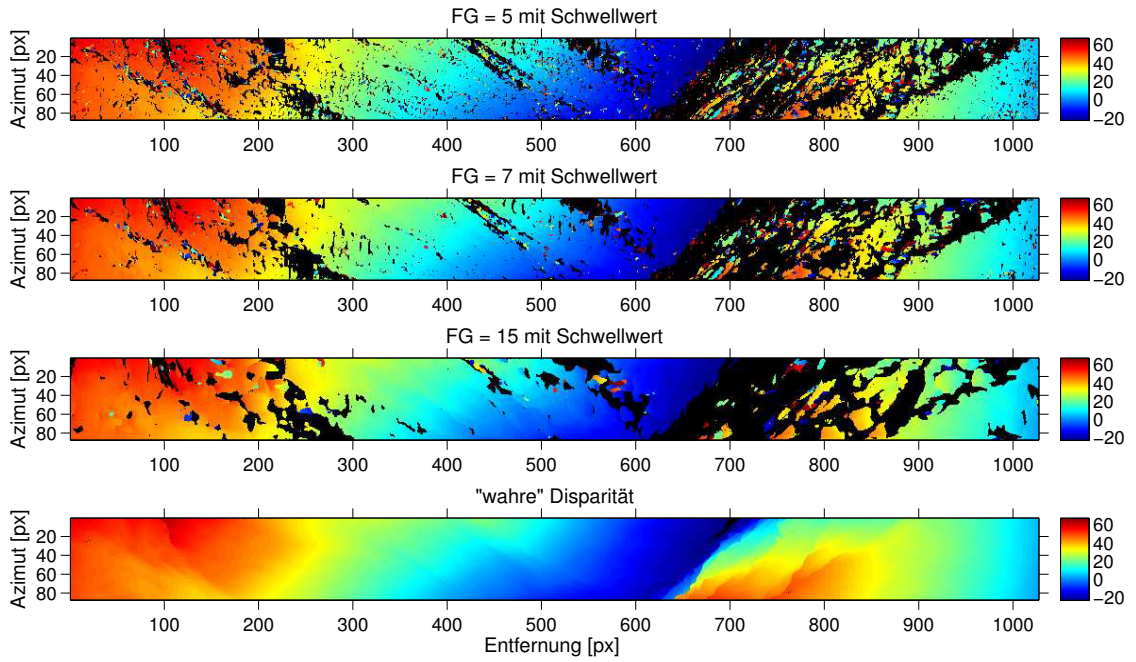


Abb. 5.11: Disparitäten der Berechnung mit dem wahren Skalierungsfaktor und mit fester Referenzfenstergröße (5x5 oben, 7x7 mittig und 15x15 unten) unter Anwendung von Schwellwerten. Die schwarzen Bereiche sind die verworfenen, ungültigen Pixel.

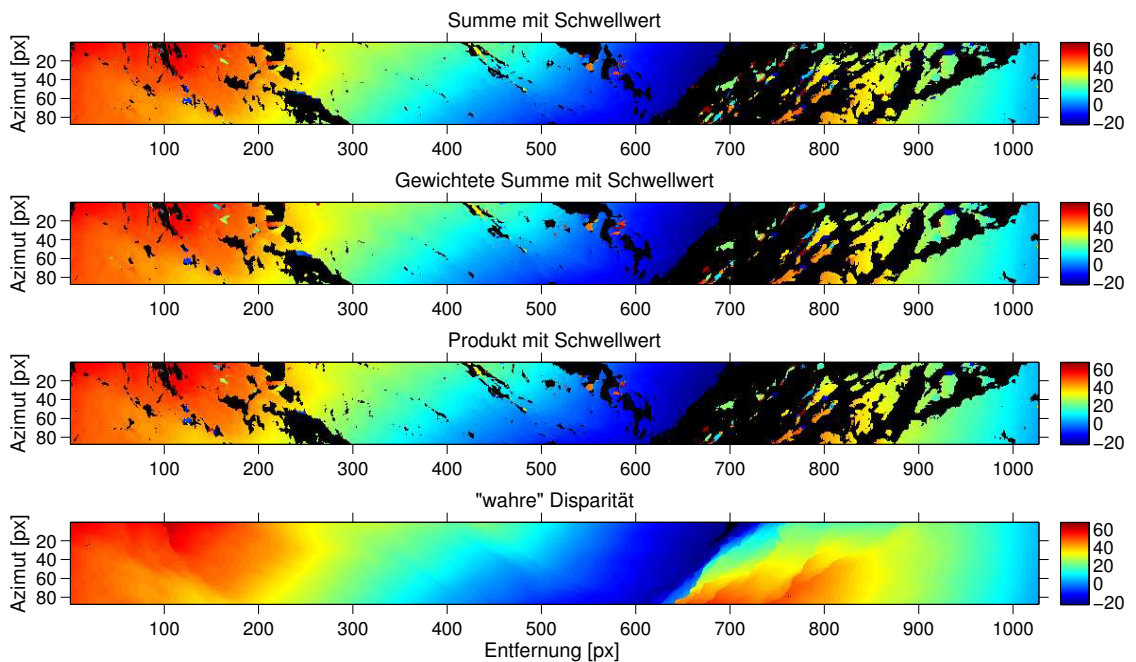


Abb. 5.12: Disparitäten der Berechnung mit dem wahren Skalierungsfaktor und mit Kombination der Korrelationsprofile unter Anwendung von Schwellwerten. Die schwarzen Bereiche sind die verworfenen, ungültigen Pixel.

Die Skalierung des Referenzfensters bringt bei den vorliegenden Daten keine Verbesserung im Vergleich zur Methode 1 bzw. zur Standardmethode mit Fenstergröße 15. Werden mehrere Skalierungen durchlaufen und diejenige mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten gewählt, benötigt dies unnötige Rechenzeit, da die meisten Berechnungen nach der Maximumsuche wieder verworfen werden. Dagegen kann die Skalierung aus den lokalen Bodenaufösungen der Eingangsdaten ohne Maximumsuche direkt angewendet werden. Allerdings müssen die abgeleiteten Faktoren auf ihre Richtigkeit untersucht und evtl. verbessert werden. Des Weiteren sollte die unterschiedliche Skalierung innerhalb der Referenzfensters berücksichtigt werden, um die Ergebnisse zu verbessern.

Tab. 5.3: Statistik der Ergebnisse aus dem Ansatz *Adaption des Referenzfensters* mit „wahrer“ Skalierung und Verwendung von Schwellwerten.

Methode	Fenstergröße/ Kombination	Mittelwert [px]	Stdabw [px]	gültige Pixel [%]	Schwellwert
Methode 2	FG = 5	-7,12	28,51	97,46	-
	FG = 7	-7,18	27,67	97,46	-
	FG = 15	-5,84	24,02	97,46	-
Methode 3	Produkt	-5,87	24,31	97,46	-
	Summe	-5,78	24,06	97,46	-
	gew. Summe	-5,85	24,05	97,46	-
Methode 2 mit Schwellwert	FG = 5	-4,42	23,12	77,39	0,85
	FG = 7	-3,72	20,23	77,33	0,80
	FG = 15	-3,08	16,67	74,92	0,67
Methode 3 mit Schwellwert	Produkt	-1,78	12,83	71,69	0,42
	Summe	-2,33	14,65	76,21	0,72
	gew. Summe	-2,19	14,25	75,30	0,68

Referenzdaten

Als Referenz diente eine Disparitätenkarte, die aus einem Bodenmodell vom Ötztal abgeleitet wurde, welches daher lediglich Geländehöhen enthält. Die berechneten Disparitäten enthalten allerdings Objekthöhen (Gebäude und Vegetation). Folglich ist die Referenzdisparitätenkarte in bebauten und vegetativen Gebieten abweichend von einer Disparität, die aus einem Oberflächenmodell abgeleitet wird. In die numerische Validierung sind die Pixel des kompletten Ausschnittes einbezogen worden. Allerdings wurde versucht, mithilfe eines Orthofotos den Bildausschnitt ohne Gebäude und Bewaldung zu wählen. Trotz dessen können einzelne Vegetationsbestände und Siedlungen die Statistik beeinflusst haben.

Fazit und Ausblick

Eine Verwendung von Referenzfenstern mit unterschiedlichen Größen und die anschließende Kombination der Korrelationsprofile hat klare Vorteile gegenüber der Berechnungen mit nur einer Fenstergröße und führt zu einer Verbesserung der Disparitäten. Hingegen bewirkt die Skalierung des Referenzfensters keine Genauigkeitssteigerung und ist bei den vorliegenden Daten unbrauchbar.

Es ist allerdings zu beachten, dass bei der Implementierung lediglich einfache Berechnungen (WTA, Normalisierte Kreuzkorrelation, keine Filterung, keine Interpolation) angewendet wurden. Einige Fehldetektionen würden durch die Anwendung des Konsistenztest, der *Backmatching*-Distanz sowie dem SGM als Stereoalgorithmus eliminiert werden.

5.2 Ansatz 2: DHM-basierte Registrierung

Für die Machbarkeitsanalyse des zweiten Ansatzes (Abschnitt 4.3) wurden die Stripmap Daten vom Ötztal und die Staring SpotLight Daten von Burgau mit RSG vom Joanneum Research prozessiert. Dieses Forschungsinstitut präsentierte im Juli 2015 erstmalig aus Staring SpotLight Daten abgeleitete Oberflächenmodelle (Gutjahr et al., 2015). Demgemäß liegt die Genauigkeit der Sensormodelle von TerraSAR-X innerhalb der Unsicherheit der manuellen Kontrollpunktmessung, so dass eine Verbesserung der Sensormodelle durch einen Ausgleich nicht nötig ist (Gutjahr et al., 2015).

Die radargrammetrische Prozessierung der beiden Datensätze wurde zum Einen mit der Epipolarrektifizierung mit Projektion der Stereobilder auf eine Tangentialebene, im Weiteren als *konventionelle Methode* bezeichnet, und zum Anderen mit der Epipolarrektifizierung mit Projektion auf eine Fläche mit zugewiesenen Höhenwerten (DHM-basierte Registrierung) durchgeführt. Für die letztgenannte Rektifizierungsmethode wurden die Höhenwerte aus einem Höhenmodell aus SRTM-Daten mit einer geometrischen Auflösung von nativen 90 m entnommen. Da die DHM-basierte Registrierung speziell auf den Effekt der Hangverkürzung und -verlängerungen eingeht, besteht hier die Erwartung, dass diese Methode zu einer Genauigkeitssteigerung der generierten Oberflächenmodelle aus Daten von bergigem Gelände (Ötztal) führt. Dagegen sollten in den Ergebnissen der Daten im Flachland (Burgau) keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Methoden bestehen. Die Arbeitsschritte der radargrammetrischen Prozessierung folgen dem in 2.2.2 beschriebenen Ablauf.

Zunächst wurde die Korrespondenzanalyse mit den in Tabelle 5.4 aufgelisteten Parametern für jedes Stereopaar durchgeführt. Da die Untersuchungen aus Abschnitt 5.1 das Verbesserungspotential der Verwendung verschiedener Referenzfenstergrößen und einer anschließenden Kombination bestätigen, wurden hier drei verschiedene Fenstergrößen (5, 7, 15) gewählt und diese anschließend additiv miteinander kombiniert. Die Korres-

Tab. 5.4: Parameter für die radargrammetrische Prozessierung der Datensätze von Burgau und Ötztal für die konventionelle Methode und die DHM-basierten Registrierung.

Pyramidenlevel	3
Suchbereich [px]	21, 15, 15
Ähnlichkeitsmaße	NCC, Census, NCC
Schwellwerte	0,75
Fenstergrößen [px]	5, 7, 15
Kombination	Addition
Algorithmus	SGM mit 8 Suchpfaden, $P_1 = 0,2$; adaptiver $P_2 = 0,8$

pondenzergebnisse von den einzelnen Bildpaaren sowie von Mehrfach-Bildpaaren wurden dem räumlichen Vorwärtsschnitt unterworfen, um die zugehörigen Bodenkoordinaten zu erhalten. Dabei wurden durch Berücksichtigung von Korrelationsschwellwerten während der Korrespondenzanalyse und strenger Residuen-Schwellwerte während des räumlichen Vorwärtsschnittes unzuverlässige Korrespondenzergebnisse verworfen. Die Validierung der DOM aus Stereopaaren sowie den Bildtripletts erfolgte anschließend durch einen numerischen Vergleich mit den verfügbaren Referenzhöhenmodellen.

5.2.1 Burgau

Da es sich bei den Burgau-Daten um Staring SpotLight-Daten mit einer sehr hohen Auflösung in Azimut handelt und die Pixel der SSC-Produkte nicht quadratisch sind, wurde als Vorverarbeitungsschritt ein Multi-looking mit sechs *Looks* in Azimutrichtung durchgeführt. Tabelle 5.5 zeigt die Anzahl der *Looks* in Azimut und Entfernung sowie die resultierende Bodenauflösung. Aus den auf diese Weise erzeugten Bilder mit annähernd quadratischen Pixeln und reduziertem *Speckle* wurden zunächst Oberflächenmodelle aus allen Stereobildpaaren des aufsteigenden bzw. des abstei-

Tab. 5.5: Für das *Multilooking* verwendete *Looks* und resultierende Auflösungen der Burgau-Daten.

Bild	Looks	Auflösung [m]
	az / rg	az / rg
ASC1	6 / 1	1,44 / 1,56
ASC2	6 / 2	1,44 / 0,97
ASC3	6 / 2	1,44 / 1,40
DSC1	6 / 1	1,44 / 1,60
DSC2	6 / 2	1,44 / 0,99
DSC3	6 / 2	1,44 / 1,40

genden Orbits mit einer Auflösung von 1 Meter erzeugt und diese anschließend zu Oberflächenmodellen aus Bildtripletts fusioniert. Da es sich bei Burgau um ein flaches Gebiet handelt, sind die Testdaten von den SAR-spezifischen Abbildungseffekten wie Hangverzerrungen, Signalüberlagerung oder Abschattung nur in geringem Maße beeinflusst. Daher wurde im Hinblick auf diese geometrischen Eigenschaften keine Maskierung zum Ausschluss von *Layover*- und Schattenbereichen durchgeführt. Um hochfrequente Anteile (Ausreißer) in den generierten Oberflächenmodellen zu unterdrücken und das Geländemodell zu glätten, wurde abschließend ein Medianfilter mit einer Filterkerngröße von 7x7 angewandt.

Die generierten DOM sind in den Abbildungen 5.13 bis 5.15 visualisiert. Es erfolgte eine Beschränkung auf die Prozessierungsmethode *DHM-basierten Registrierung*, da visuell zu den Ergebnissen der konventionelle Methoden kein Unterschied auszumachen ist. Abbildung 5.13 zeigt Oberflächenmodelle, die aus den drei Stereokonstellationen des Datensatzes des aufsteigenden Orbits generierten wurden. In diesen sind vor allem die durch die Punktverwerfung entstandenen Lücken (schwarze Bereiche) auffällig. Es wird deutlich, dass in dem Stereopaar 2-3 die wenigsten Punkte verworfen wurden, wogegen die anderen beiden Konstellationen ähnlich viele ungültige Bereiche aufweisen. Dieser Eindruck wird auch von den Prozentsätzen der *gültigen Pixel* in der Tabelle 5.6 bestätigt. Die Bildpaare des absteigenden Orbits verhalten sich hinsichtlich der Prozessierungszuverlässigkeit ähnlich.

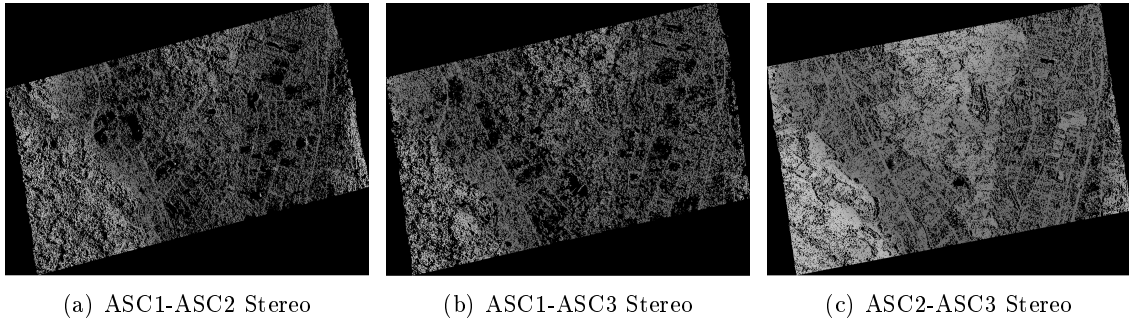


Abb. 5.13: Digitale Oberflächenmodelle von Burgau aus den drei verfügbaren Stereokonstellationen des aufsteigenden Orbits.

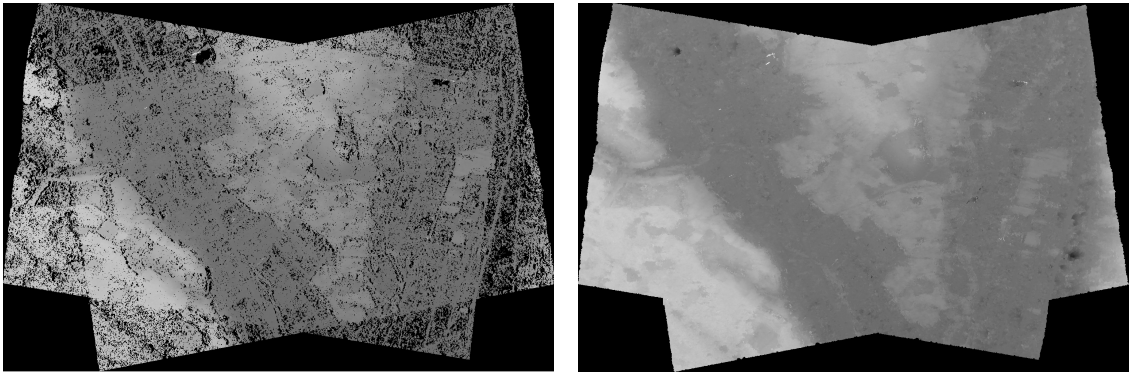


Abb. 5.14: Digitale Oberflächenmodelle aus dem Stereopaar 2-3 des auf- und absteigenden Orbits mit eliminierten unzuverlässigen Punkten (links) sowie nach der Interpolation dieser Bereiche (rechts).

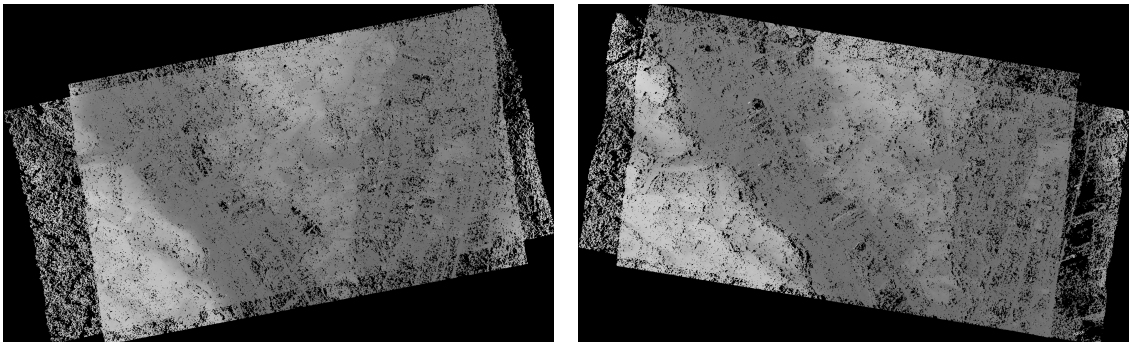


Abb. 5.15: Oberflächenmodelle aus den Bildtriplets des aufsteigenden (links) und des absteigenden Orbits (rechts).

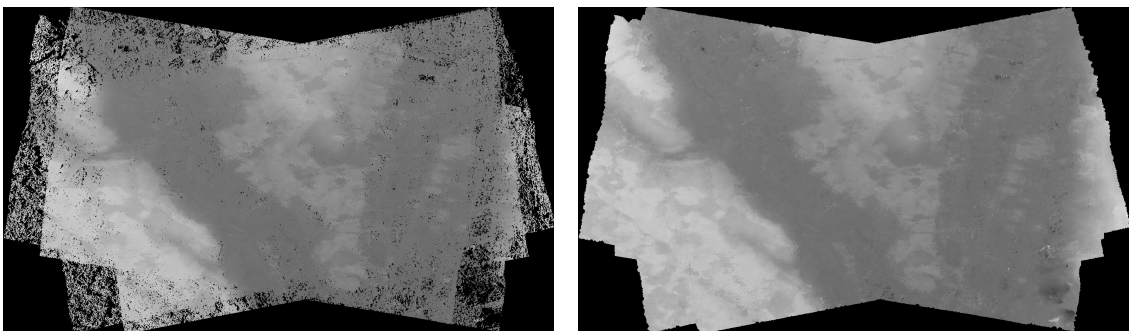
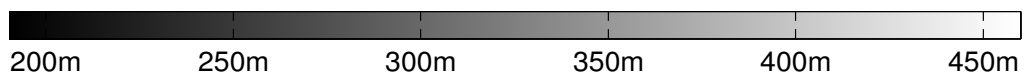


Abb. 5.16: Fusioniertes DOM von Burgau aus den Bildtriplets des auf- und absteigenden Orbits. Links: Eliminierung unzuverlässiger Punkte. Rechts: Interpolation dieser Bereiche.



Aus den Bildpaaren des aufsteigenden und absteigenden Orbits mit der besten Korrelationsperformance ASC2-ASC3 und DSC2-DSC3 wurde durch Fusionierung ein lückenhaftes, sowie nach Interpolation der lückenhaften Bereiche ein dichtes Oberflächenmodell generiert (Abbildung 5.14). In den Oberflächenmodellen aus Bildtripletts beider Orbits sind die Anteile der gefundenen Punktzuordnungen wesentlich höher als in den einzelnen Stereopaaren, da sich der Informationsgehalt jeweils ergänzt (Abbildung 5.15). In der untersten Abbildung 5.16 sind die Oberflächenmodelle der fusionierten Bildtripletts des aufsteigenden und absteigenden Orbits dargestellt. Bereits im DOM, in dem die durch Punktverwerfung entstandenen Lücken noch vorhanden sind, ist eine relativ dichte Punktzuordnung zu beobachten. Durch Interpolation dieser Bereiche wird ein glattes, dichtes Oberflächenmodell erzielt.

Genauigkeitsuntersuchung

Für die Validierung wurden Differenzhöhen aus den radargrammetrisch erzeugten Oberflächenmodellen und dem Referenzhöhenmodell generiert. In Abbildung 5.17 ist das Differenzmodell aus der konventionellen Prozessierung und in Abbildung 5.18 das Differenzmodell aus der Prozessierung mit der DHM-basierten Registrierung farbkodiert dargestellt. Die warmen Farbtöne repräsentieren die positiven Höhendifferenzen, d.h. an diesen Stellen ist das generierte Oberflächenmodell höher als das Referenzmodell. Die Häufigkeitsverteilungen der Höhendifferenzen sind als Histogramme in der Abbildung 5.20 gezeigt. Die meisten Höhendifferenzen liegen im Bereich von ± 10 Metern. Beide generierten Höhenmodelle sind im Mittel etwas höher als das Referenzmodell.

Visuell sind zwischen beiden Differenzmodellen keine großen Unterschiede auszumachen. Beide zeigen an vielen Waldrändern sowie entlang von Alleen, Halballeen und baumbestanden Flüssen oft Rampen, die auf die Seitensichtgeometrie während der Datenaufnahme zurückzuführen sind. Dadurch kommt es zu Abschattungen hinter den Baumreihen, wo keine plausible Höhenrekonstruktion möglich ist. Andere Ausreißer von 10 Metern und mehr liegen in Problemen während der Korrespondenzanalyse begründet, wo teilweise durch zu große Ähnlichkeit in homogen strukturierten Regionen falsche Zuordnungen gebildet werden.

An den Randbereichen des detektierten Gebietes, die nicht von allen Bildern abgedeckt sind, treten größere Höhenabweichungen auf. Durch die geringere Redundanz von korrespondierenden Punkten wurden hier weniger Punkte verworfen. Beide Differenzbilder zeigen in nicht bewaldeten Gebieten geringere Höhendifferenzen sowie Höhendifferenzsprünge mit geringerer Frequenz als in bebauten und bewaldeten Gebieten. Zum Vergleich ist in Abbildung 5.19 das Orthophoto abgebildet, auf welchem die Waldbestände unmittelbar zu erkennen sind. Aufgrund der großen temporalen Differenz zwischen der Akquirierung der LiDAR- und TerraSAR-X-Daten sind v.a. die Waldgebiete durch ihr Wachstum von zeitlichen Veränderungen beeinflusst. Daher wurden die Waldgebiete für die numerische Validierung mittels einer Nicht-Wald-Maske ausgeschlossen, die in Abbildung 5.19 gelb

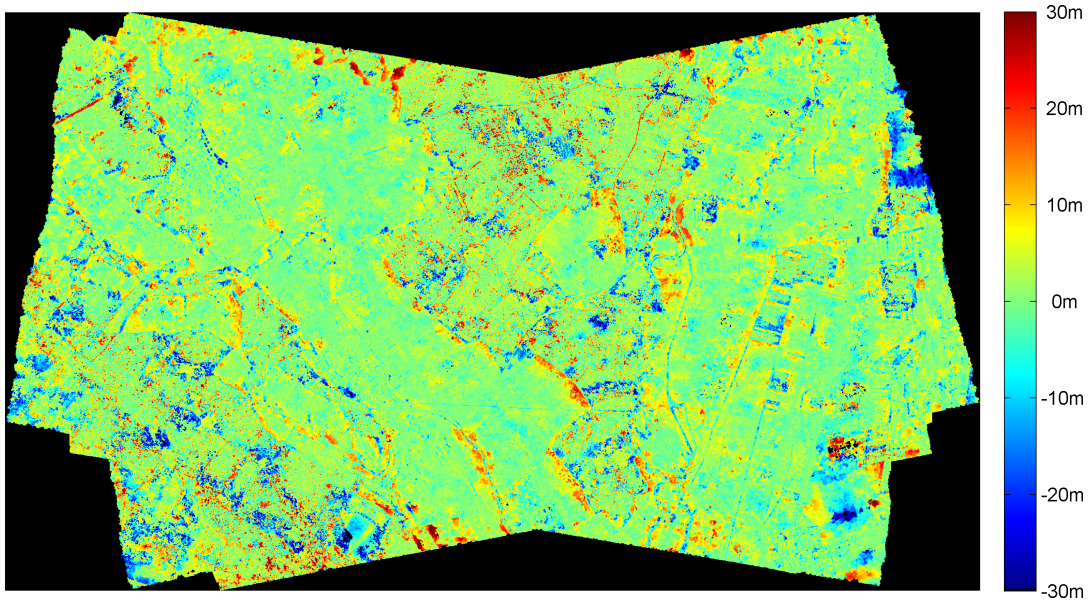


Abb. 5.17: Farbkodiertes Höhendifferenzmodell von Burgau (Prozessierung mit konventioneller Methode aus den Bildtripletts des aufsteigenden und absteigenden Orbits).

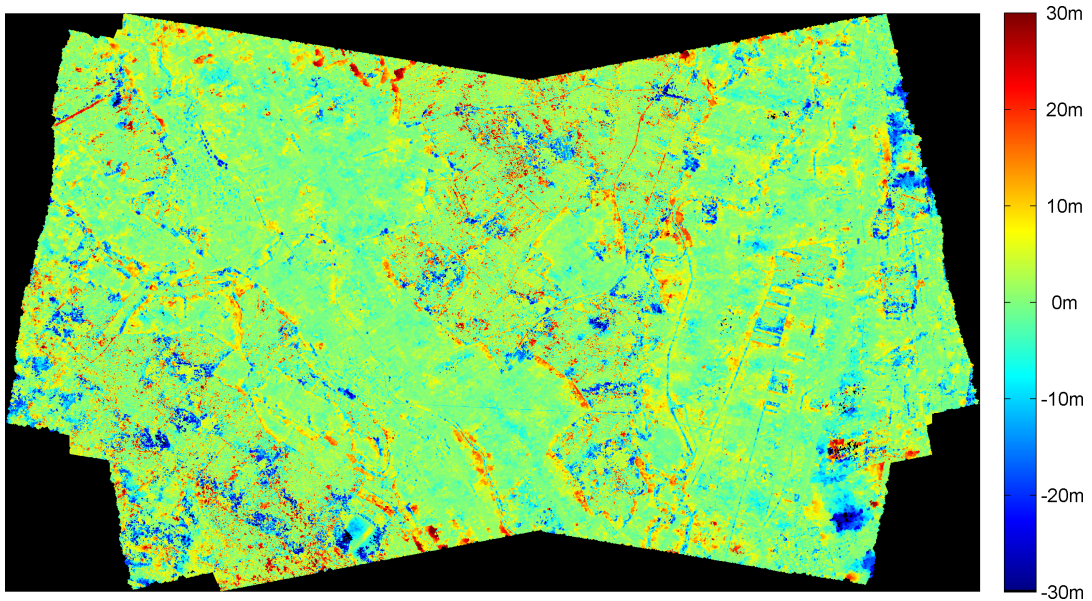


Abb. 5.18: Farbkodiertes Höhendifferenzmodell von Burgau (Prozessierung mit DHM-basierter Registrierung aus den Bildtripletts des aufsteigenden und absteigenden Orbits).

eingezeichnet ist. Für dieses nicht bewaldete Gebiet wurden Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen berechnet, die in Tabelle 5.6 für die Oberflächenmodelle jeglicher Konstellation zusammengefasst sind. Die besten Werte pro Datensatz sind jeweils hervorgehoben. Ebenfalls aufgelistet sind die Schnittwinkel ($\Delta\Theta$) und der Prozentsatz der gültigen rekonstruierten Höhenwerte.



Abb. 5.19: Orthophoto Burgau. Die Nicht-Wald-Maske (gelbes Polygon) deckt bestandsfreie Flächen ab, die für die numerische Validierung herangezogen wurden. Der weiß eingezeichnete Bereich stellt die gemeinsame Abdeckung aller verwendeter SAR-Daten dar (ASC-DSC-Triplett).

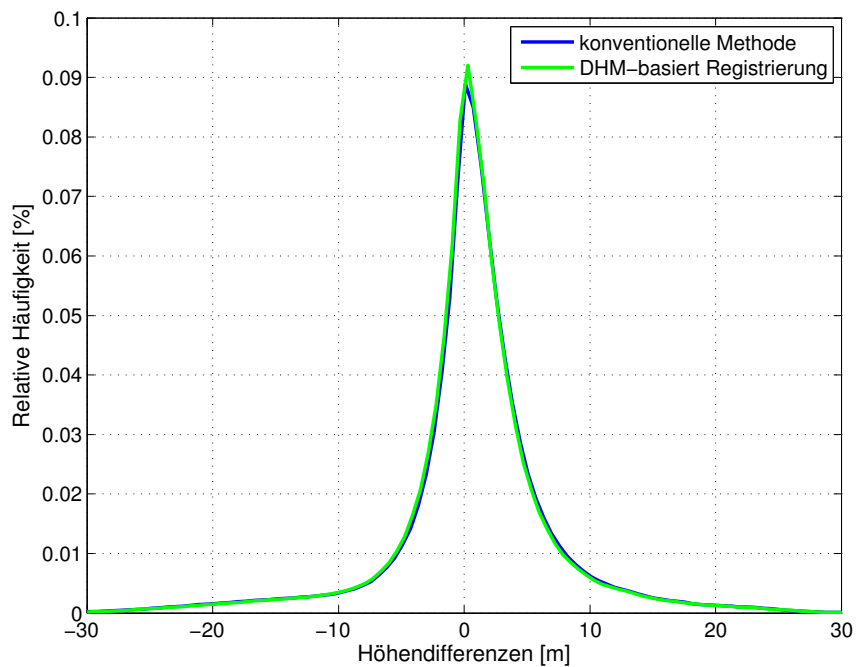


Abb. 5.20: Histogramme der Höhendifferenzen von Burgau für die konventionelle Methode (blau) und die DHM-basierte Registrierung (grün).

Beim Vergleich der statistischen Kennzahlen kann im Allgemeinen folgende Schlussfolgerung gezogen werden: Die Mittelwerte besitzen nicht immer dasselbe Vorzeichen, was bedeutet, dass keine systematische Abweichung zum Referenzmodell vorliegt. Die Tendenz zeigt, dass die generierten Oberflächenmodelle etwas höher liegen als das Referenzmodell, was in den Histogrammen der Höhendifferenzen bereits bestätigt wurde. In den Oberflächenmodellen aus den Datentriplets wurden die wenigsten Punkte verworfen, da sich hier die Geländeinformationen von Aufnahmen mit verschiedenen Betrachtungswinkeln ergänzen. Bei der Fusionierung der Datensätze des aufsteigenden und absteigenden Orbits komplementieren sich die Informationen, so dass hier die Oberflächenmodelle die meisten gültigen Punkte aufweisen. Bei den Stereokonstellationen besitzt die Kombination 2 - 3 die beste Performance. Dieser Effekt kann auf den kleinsten zeitlichen Abstand der Datenakquisition zurückgeführt werden, da die Bilder 2 und 3 an zwei aufeinanderfolgenden Tagen aufgenommen wurden, wogegen die Bilder 1 drei Monate später aufgezeichnet wurden (siehe Tabelle 4.1). Daher weist das Stereopaar 2 - 3 minimale zeitliche Veränderungen auf, während alle anderen größere temporale Dekorrelationen enthalten.

Beim Vergleich der konventionellen Prozessierung mit der neu entwickelten DHM-basierten Registrierung kann keine allgemein auf alle Datensätze gültige Aussage getroffen werden. So verschlechtern sich die Mittelwerte bei der Prozessierung mit der DHM-basierten Registrierung bei den Konstellationen 1 - 2 und 1 - 3, wogegen sie sich bei der Konstellation 2 - 3 sowie bei der Verwendung von Bildtriplets verbessern. Die Standardabweichung verringert sich bei der neuen Methode bei den Daten des aufsteigenden Orbits in allen Konstellationen, wohingegen die Daten des absteigenden Orbits mit geringerer Genauigkeit prozessiert

Tab. 5.6: Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen innerhalb der Nicht-Wald-Maske sowie der Prozentsatz der im räumlichen Vorwärtsschnitt nicht verworfenen Punkte aus der Prozessierung des Burgaudatensatzes. Desweiteren die Schnittwinkel $\Delta\Theta$ der verwendeten Konstellationen.

			konventionelle Methode			DHM-basierte Reg.		
Datensatz	Modell	$\Delta\Theta$ [°]	Mw [m]	Std [m]	gültig [%]	Mw [m]	Std [m]	gültig [%]
Burgau ASC	1 - 2	15,01	-0,39	6,86	46,26	-0,92	6,68	46,11
	1 - 3	34,10	-0,14	4,93	48,54	-0,37	4,88	48,63
	2 - 3	19,81	1,82	4,46	70,83	1,69	4,31	70,98
	1 - 2 - 3	34,10	0,77	4,56	85,32	0,54	4,47	85,57
Burgau DSC	1 - 2	15,17	-1,36	7,01	45,28	-1,67	7,19	45,49
	1 - 3	35,18	-0,51	4,81	47,80	-0,59	4,84	48,40
	2 - 3	20,01	1,81	4,46	70,32	1,69	4,37	84,74
	1 - 2 - 3	35,18	0,34	4,58	84,67	0,18	4,56	90,93
Burgau ASC - DSC	1 - 2	73,71	-0,89	6,78	64,62	-1,34	6,79	64,61
	1 - 3	113,53	-0,33	4,73	65,66	-0,49	4,73	65,95
	2 - 3	113,53	1,88	4,08	84,37	1,75	3,98	84,74
	1 - 2 - 3	113,53	0,64	3,38	90,68	0,48	3,32	90,93

werden. Die Standardabweichungen bei der Verwendung von Bildtripletts steigt wiederum geringfügig in allen Konstellationen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass beide angewandten Methoden geeignet sind, um Höhenmodelle mit einer Genauigkeit von ca. 3,3 m zu generieren. Bei flachem Gelände treten weder nennenswerte SAR-spezifische Verdeckungsgebiete noch Überlagerungseffekte durch zu große Hangneigung auf. Daher ist mit dem neuen Ansatz der DHM-basierten Registrierung, der speziell auf die geometrischen Verzerrungen eingeht, keine signifikante Verbesserung festzustellen.

Im Vergleich zu den in Gutjahr et al. (2015) generierten Oberflächenmodellen aus MGD-Produkten (*Multilook Ground Range Detected*) des gleichen Testgebietes wurden mit den hier vorgestellten Prozessierungen wesentlich mehr gültige Höhenwerte bei ähnlicher Genauigkeit rekonstruiert.

5.2.2 Ötztal

Auch aus dem Datensatz des Ötztals wurden Oberflächenmodelle mit einer Auflösung von 1 Meter aus den Stereobildpaaren bzw. den Bildtripletts des aufsteigenden und absteigenden Orbits erstellt. Da es sich hier um hochgebirgisches Gelände handelt, sind die Daten sehr stark von Signalüberlappung (*Layover*) und Abschattung beeinflusst, wodurch in den betroffenen Regionen keine zuverlässige Punktzuordnung möglich ist. Daher wurden diese Bereiche mithilfe einer Layover-Schatten-Maske ausgeschlossen. Dazu wurde aus der Sensorgeometrie zum Aufnahmezeitpunkt für jedes Bild eine Klassifizierung der Bildbereiche angefertigt, die die Klassen „Schatten“, „Hintergrund“ (weder Schatten noch Layover), „Layover“ und „Schatten oder Layover“ enthält. Aus diesem klassifizierten Daten wird die zweite Klasse *Hintergrund* selektiert und alle anderen Bereiche als Maskenklasse zusammengefasst. Für jedes Stereopaar wurde eine individuelle Maske berechnet und auf das jeweilige generierte Stereo-Oberflächenmodell angewendet. In Abbildung 5.21 sind diese Schritte für das Stereopaar 1-2 des aufsteigenden Orbits dargestellt: links die klassifizierten Bilder mit den vier Klassen, mittig die daraus erstellten Einzelbild-Masken; rechts oben die fusionierte Stereo-Maske und rechts unten das Stereo-Oberflächenmodell unter Anwendung der Stereo-Maske. Vor allem in der Maske von ASC1 ist zu erkennen, dass sich die maskierten Bereiche auf den dem Sensor abgeneigten Berghängen befinden. Für die Generierung von Oberflächenmodellen aus Bildtripletts wurden die jeweiligen maskierten Stereo-Oberflächenmodelle miteinander fusioniert. Zur Eliminierung der hochfrequenten Anteile (Ausreißer) und zur Glättung der generierten Oberflächenmodelle wurde abschließend ein Medianfilter mit einer Filterkerngröße von 11x11 angewandt.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.23 bis 5.26 visualisiert, wobei ebenfalls eine Beschränkung auf die Methode der DHM-basierten Registrierung stattfand. Die Gegenüberstellung erfolgt nach dem gleichen Muster wie im Burgaudatensatz: Abbildung 5.23 zeigt die Oberflächenmodelle, welche aus den drei Stereokonstellationen des Datensatzes des aufsteigenden Orbits generiert und in denen die Datenlücken noch nicht gefüllt wurden. Hier stechen vor allem die jeweils vom Sensor abgewandten Berghänge hervor, in

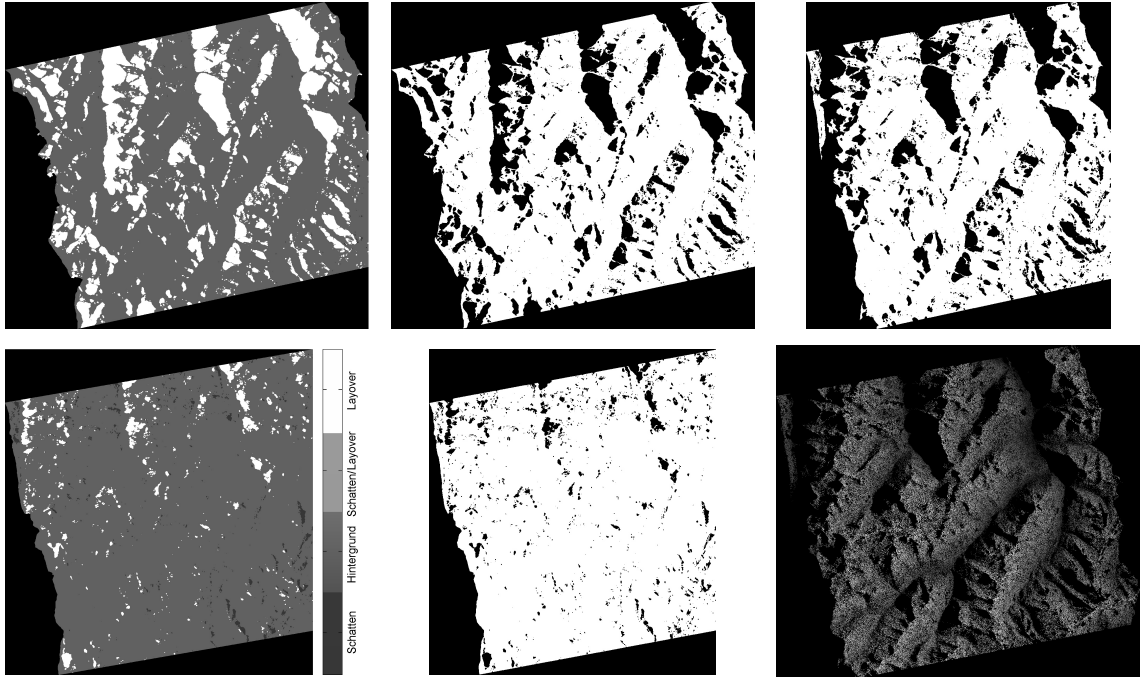


Abb. 5.21: Anwendung einer Layover-Schatten-Maske auf die Oberflächenmodelle aus den Ötztaldaten. Links die Klassifizierungen von ASC1 (oben) und ASC2 (unten), mittig jeweils die daraus abgeleiteten Masken. Schwarze Bereiche wurden auf NoData gesetzt und die weißen Bereiche signalisieren die Durchlassbereiche. Rechts das Oberflächenmodell aus der Stereokonstellationen ASC1-ASC2 mit angewandter Maske.

denen kaum korrespondierende Punkte gefunden wurden. Diese Bereiche werden später mit der Layover-Schatten-Maske maskiert. Es kann visuell keine der drei Konstellationen mit bester Performance hervorgehoben werden. In Tabelle 5.7 sind die Prozentsätze der gültigen Pixel aufgelistet, die den visuellen Eindruck bestätigen: die Anzahl der verworfenen Punkte ist in allen drei Stereokonstellationen des aufsteigenden Orbits annähernd gleich. Es fällt auf, dass mit den Bilddaten des aufsteigenden Orbits in jeder Konstellation mehr gültige Punktzuordnungen gefunden wurden, als mit den Daten des absteigenden Orbits. In dem Oberflächenmodell aus den Bildpaaren des auf- und absteigenden Orbits ASC2-ASC3 und DSC2-DSC3 (Abbildung 5.24) ist bereits eine höhere Punktdichte zu erkennen. Die Abbildung 5.26 zeigt das Oberflächenmodell aus Bildtriplets des aufsteigenden Orbits (links) und des absteigenden Orbits (rechts). Auch hier bestätigt sich, dass der Anteil der gültigen Punktzuordnungen in einem Bildtriplett wesentlich höher ist als die Anteile in den einzelnen Stereopaaren. Bei der Fusionierung der Oberflächenmodelle der Bildtripletts des aufsteigenden und absteigenden Orbits zu einem gemeinsamen Modell (unterste Abbildung 5.26) ist bereits in dem lückenhaften Oberflächenmodell links eine relativ dichte Punktverteilung zu beobachten. Durch Interpolation der Lücken wird ein glattes, dichtes Oberflächenmodell erhalten. Abbildung 5.22 zeigt das generierte digitale Oberflächenmodell aus Bildtripletts des aufsteigenden und absteigenden Orbits ohne Nachbearbeitung wie Interpolation und Filterung.

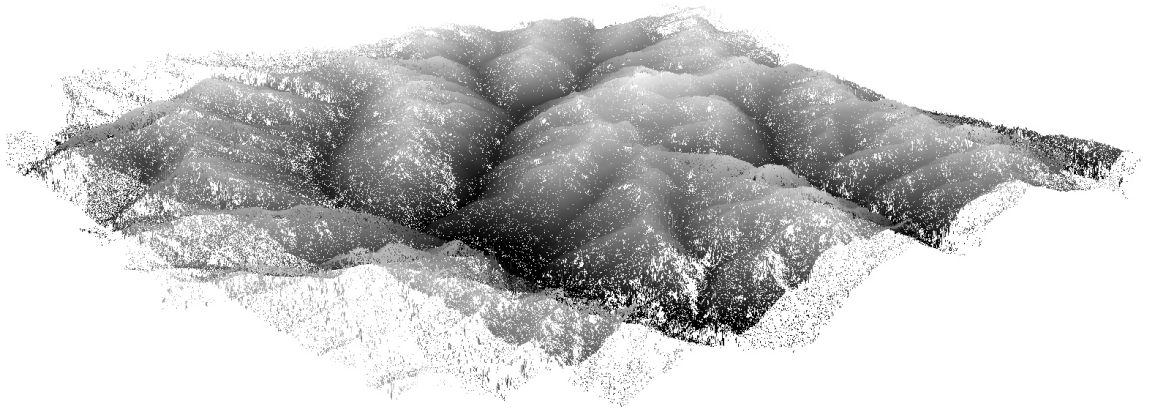


Abb. 5.22: Digitales Oberflächenmodell vom Ötztal ohne Nachbearbeitungen.

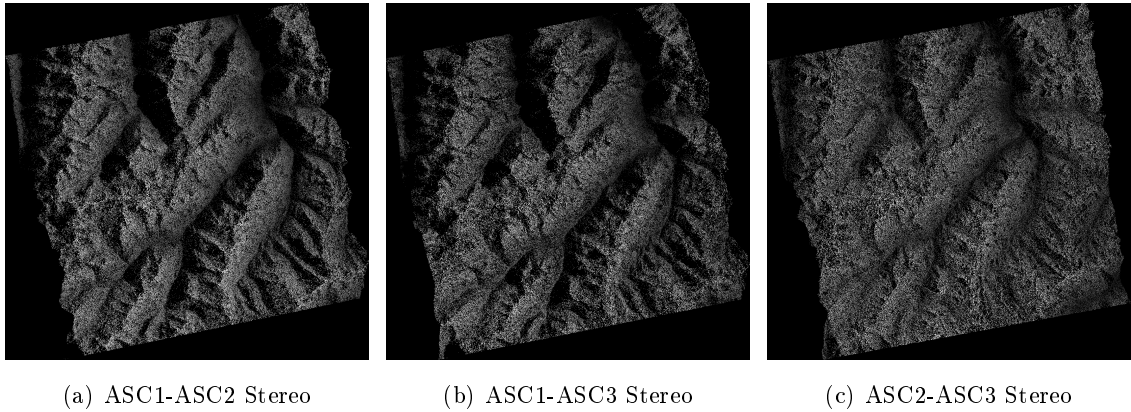


Abb. 5.23: Digitale Oberflächenmodelle aus den drei verfügbaren Stereokonstellationen des aufsteigenden Orbits des Testdatensatzes vom Ötztal.

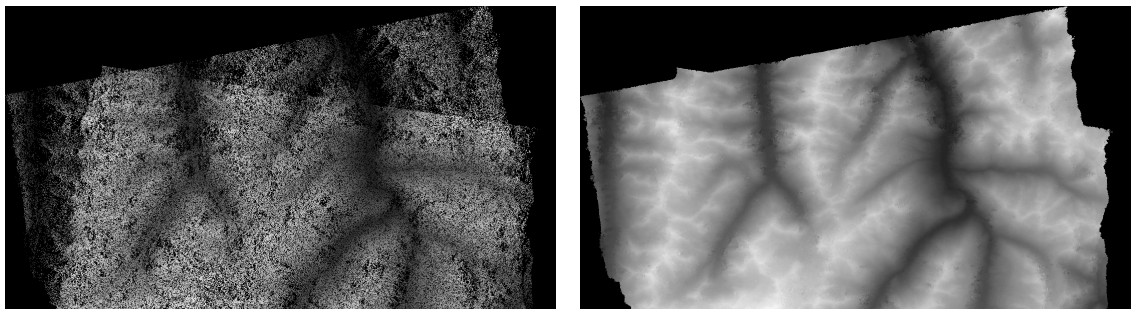


Abb. 5.24: Digitale Oberflächenmodelle aus dem Stereopaar 2-3 des auf- und absteigenden Orbits mit eliminierten unzuverlässigen Punkten (links) sowie nach der Interpolation dieser Bereiche (rechts).

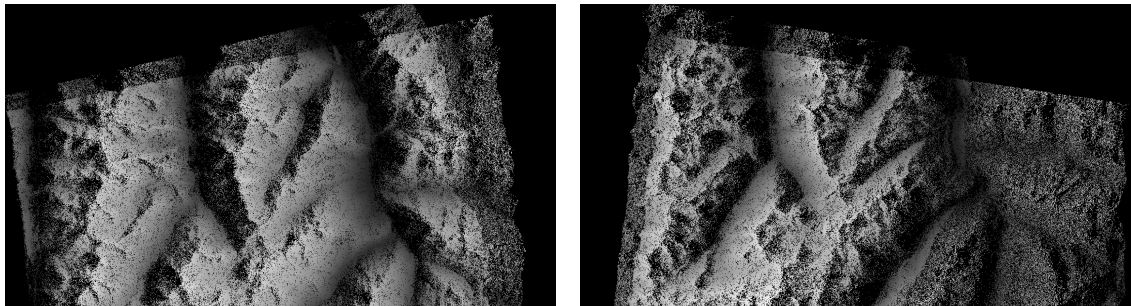


Abb. 5.25: Oberflächenmodelle aus den Bildtripletts des aufsteigenden (links) und des absteigenden Orbits (rechts).

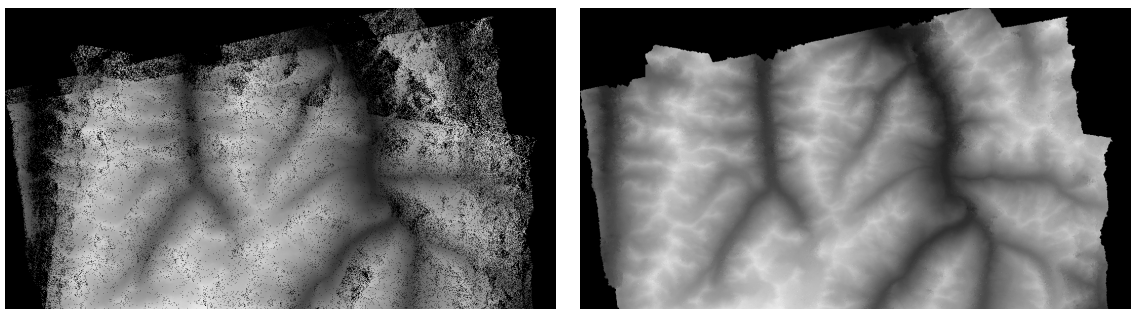
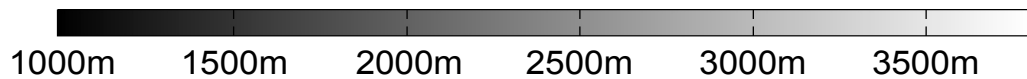


Abb. 5.26: Fusioniertes DOM von Burgau aus den Bildtripletts des auf- und absteigenden Orbits. Links: Eliminierung unzuverlässiger Punkte. Rechts: Interpolation dieser Bereiche.



Genauigkeitsuntersuchung und Diskussion

Auch bei dem Datensatz vom Ötztal erfolgte die Validierung durch einen visuellen und numerischen Vergleich mit verfügbaren Referenzhöhenmodellen bzw. den abgeleiteten Differenzhöhen. Da ein Bodenmodell ohne Bewaldung und Bebauung als Referenzmodell diente, wurde die Vegetation durch eine Waldmaske (Abbildung 5.31 rechts) von der Genauigkeitsuntersuchung ausgeschlossen.

Die farbkodierten Differenzmodelle sind in den Abbildungen 5.27 für die konventionelle Methode und 5.28 für die DHM-basierte Registrierung gegenübergestellt, wobei bei dieser Ansicht kein großer Unterschied zu erkennen ist. Im Histogramm in Abbildung 5.29 hingegen sticht sofort die unterschiedliche Häufigkeit der Höhendifferenzen hervor. Das mit der konventionellen Methode erstellte Oberflächenmodell scheint wesentlich weniger Höhendifferenzen in kleinen Bereichen aufzuweisen. In beiden Modellen liegen die meisten Höhendifferenzen im Bereich von -20 m bis 30 m.

Zur Orientierung und zum besseren Vergleich ist in Abbildung 5.30 ein Referenzoberflächenmodell und in Abbildung 5.31 das Orthophoto vom aufgenommenem Gebiet visualisiert. Dabei zeigt sich, dass die geringsten Höhendifferenzen (grünliche Farbgebung) im gemäßigt geneigten Gelände verteilt sind. In den Gletschergebieten sind die Differenzhöhen mehrheitlich negativ (hellblaue Färbung), d.h. hier ist das generierte Oberflächenmodell ca. 10 m niedriger als das Referenzmodell. Eine erste Vermutung ist, dass dieser Effekt auf einen Gletscherrückgang zurückzuführen ist. Allerdings liegen die Zeitpunkte der Datenakquirierung der Referenzdaten (LiDAR) und der TerraSAR-X Daten lediglich zwei Jahre auseinander, so dass eine Schlußfolgerung einer Gletscherschmelzung von bis zu 10 m innerhalb dieser Zeit sehr gewagt erscheint. Nach Auskünften des Glaziologen

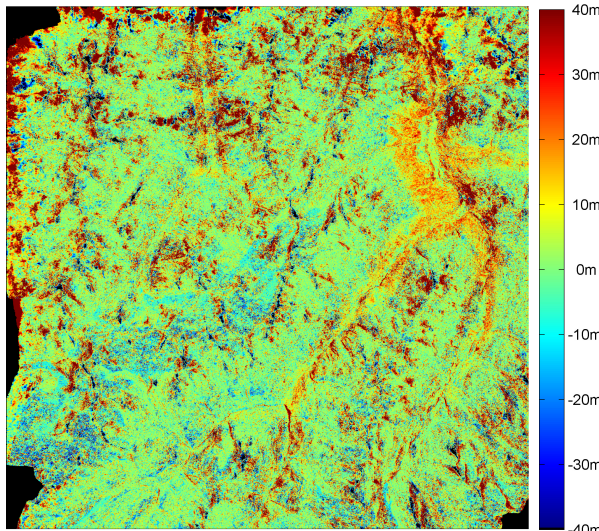


Abb. 5.27: Farbkodiertes Höhendifferenzmodell vom Ötztal (Prozessierung mit konventioneller Methode aus den Bildtriplets des aufsteigenden und absteigenden Orbits, maskiert, nicht gefiltert).

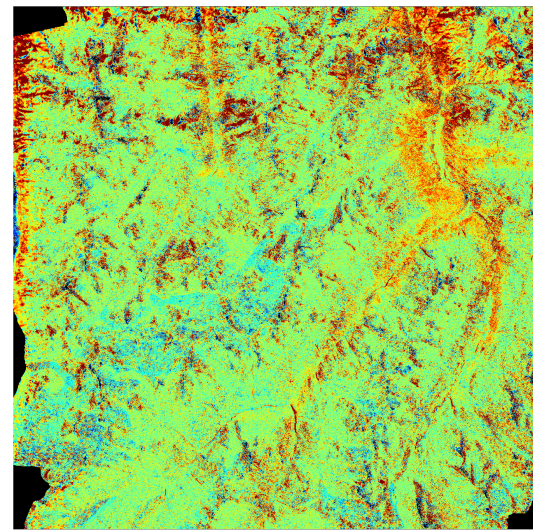


Abb. 5.28: Farbkodiertes Höhendifferenzmodell vom Ötztal (Prozessierung mit DHM-basierter Registrierung aus den Bildtriplets des aufsteigenden und absteigenden Orbits, maskiert, nicht gefiltert).

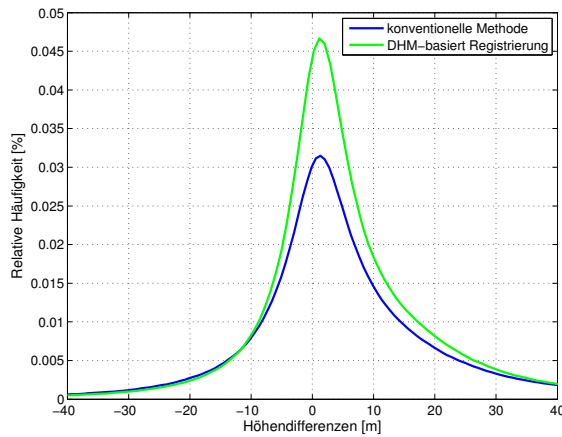


Abb. 5.29: Histogramme der Höhendifferenzen vom Ötztal für die konventionelle Methode (blau) und die DHM-basierte Registrierung (grün).

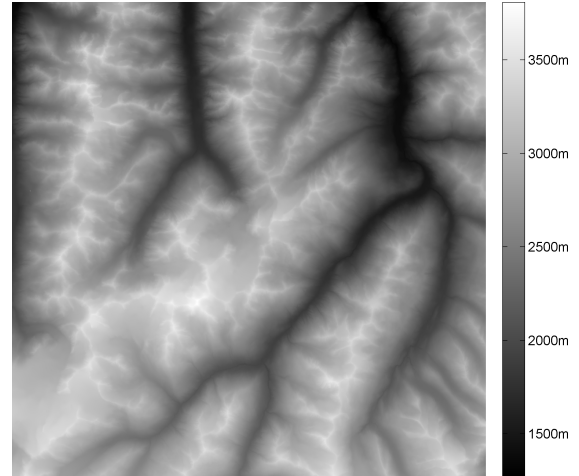


Abb. 5.30: Referenzoberflächenmodell vom Ötztal aus LiDAR-Daten.

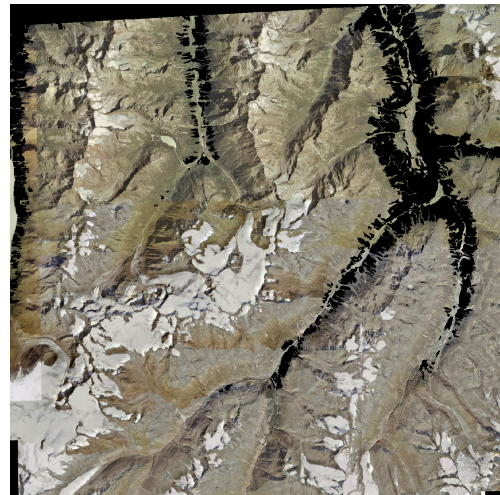
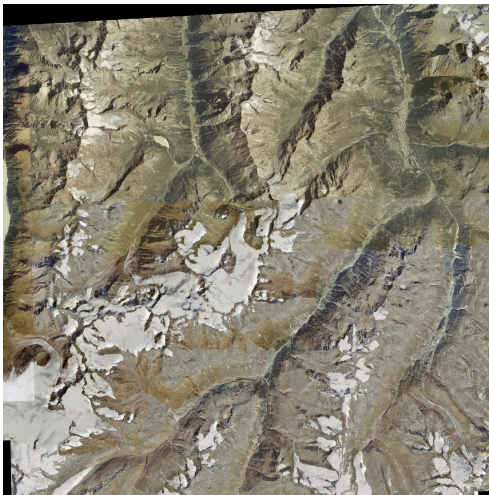


Abb. 5.31: Orthophoto vom Ötztal ohne (links) und mit Waldmaske (rechts).

Prof. Mag. Dr. Lieb ist ein Absinken von Gletscheroberflächen um $\pm 10\text{ m}$ in zwei Jahren zwar durchaus möglich, allerdings nur auf tief gelegenen, großen und schlecht mit Eisnachschub versorgten Gletscherzungen. In den Ötztaler Alpen sind solche Werte tatsächlich nur an einzelnen Gletscherzungen unterhalb von 2500 m vorstellbar (z.B. Taschach- oder Gepatschferner), niemals jedoch auf größeren Gletscherflächen oder gar als Gebietsmittel. Daher liegen die Ursachen für eine solche Höhendifferenz wohl im Versagen der Korrespondenzanalyse in diesen homogen strukturierten Gebieten begründet. Die vom Algorithmus verworfenen Punkte werden während der Interpolation mit den Werten der in der Umgebung am nächsten liegenden gültigen Punkte gefüllt. Weil Gletscher allerdings immer eine konvexe Form haben, wurde nicht die wahre Höhe erfasst.

Die Täler zeichnen sich durch die gelblich-orangen Bereiche aus, hier sind die generier-

ten Oberflächenmodelle 10 bis fast 30 m höher als das Referenzmodell. In diesen Gebieten befinden sich bis zur Baumgrenze bei ca. 2300 m Höhe starke Waldbestände (siehe Orthophoto 5.31 und Referenzhöhenmodell 5.30). Daher resultieren diese Abweichungen aus der Differenz zwischen Oberflächen- und Geländemodell und spiegeln die Baumhöhen wider. Diese Bereiche werden mithilfe einer Waldmaske aus der numerischen Validierung ausgeschlossen. An den Bergspitzen und Graten ist keine symmetrische Abweichung zu erkennen, die Frequenzen und Amplituden der Abweichungen sind relativ hoch und unregelmäßig.

In der Tabelle 5.7 sind Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzmodelle aus der Prozessierung mit der konventionellen Methode (links) aufgelistet, ebenso die Ergebnisse der DHM-basierten Registrierung (rechts) aller Konstellationen. Die besten Werte pro Datensatz sind hervorgehoben. Ebenfalls sind die Schnittwinkel ($\Delta\Theta$) und der Prozentsatz der gültigen rekonstruierten Höhenwerte aufgeführt.

Tab. 5.7: Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen ohne Waldbestände sowie der Prozentsatz der im räumlichen Vorwärtsschnitt nicht verworfenen Punkte aus der Prozessierung des Ötztal-datensatzes. Zudem die Schnittwinkel $\Delta\Theta$ der verwendeten Konstellationen.

			konventionelle Methode			DHM-basierte Reg.		
Datensatz	Modell	$\Delta\Theta$ [°]	Mw [m]	Std [m]	gültig [%]	Mw [m]	Std [m]	gültig [%]
Ötztal ASC	1 - 2	13,26	3,20	15,49	37,47	2,85	15,13	36,58
	1 - 3	22,70	1,04	13,26	34,65	1,74	11,79	39,17
	2 - 3	9,44	6,06	23,93	37,70	5,38	23,06	37,24
	1 - 2 - 3	22,70	2,67	15,62	71,17	2,80	14,93	76,69
Ötztal DSC	1 - 2	12,28	3,92	15,37	31,81	4,14	15,66	31,80
	1 - 3	22,81	1,16	13,73	28,26	2,24	12,40	34,05
	2 - 3	10,53	5,45	22,20	36,33	4,73	20,85	35,51
	1 - 2 - 3	22,81	3,30	16,86	55,84	4,32	16,30	60,49
Ötztal ASC - DSC	1 - 2	85,57	3,22	15,42	79,47	4,14	15,66	51,87
	1 - 3	105,55	1,10	13,78	74,92	2,24	12,40	56,01
	2 - 3	105,55	5,42	22,09	89,81	4,73	20,85	90,66
	1 - 2 - 3	105,55	3,47	15,13	88,73	3,89	14,67	91,09

Die Konstellation 1 - 3 liefert in jedem Datensatz Oberflächenmodelle mit den geringsten Mittelwerten und Standardabweichungen. Diese sind oftmals um mindestens die Hälfte geringer als bei den anderen Konstellationen. Die höchsten Werte werden mit der Stereokonstellation 2-3 erreicht.

Nach Raggam et al. (2009) steigt die 3D-Genauigkeit des konstruierten Oberflächenmodells mit zunehmendem Stereoschnittwinkel. Die Abhängigkeit der 3D-Genauigkeit vom Schnittwinkel ist in Abbildung 5.32 skizziert. Ein veränderter Einfallswinkel resultiert in einem räumlichen Punktfehler D , der in der Grafik in seine Komponenten

Lagefehler Δp und Höhenfehler Δh aufgeteilt ist. Dies kann auf den Einfluss eines Schräg-distanzfehlers Δr zurückgeführt werden, der, wie bereits in Leberl (1978) erläutert, in einem entsprechenden Lagefehler Δp und einem Höhenfehler Δh resultiert:

$$\Delta p = \Delta r \frac{\cos \Theta_1}{\sin \Delta \Theta} \quad (16)$$

$$\Delta h = \Delta r \frac{\sin \Theta_1}{\sin \Delta \Theta} \quad (17)$$

Abbildung 5.33 zeigt eine Simulation der Abhängigkeit der Lage- und Höhenfehler von Einfallswinkel Θ und Stereoschnittwinkel $\Delta \Theta$ (rechte und mittlere Grafik) unter der Annahme von $\Delta r = 1$ m. Ein steigender Schnittwinkel führt zu nicht linear abnehmendem Lage- und Höhenfehler. Der Beobachtungswinkel Θ beeinflusst dabei die Größe. Im Gegensatz zu größeren Beobachtungswinkeln ergibt ein kleiner Winkel Θ (blaue Kurve in Abbildung 5.33) einen geringeren Höhenfehler, allerdings einen größeren Lagefehler. Dies lässt sich ebenso geometrisch erklären: Je steiler der Sensor auf das Gelände gerichtet ist, desto genauer kann die Höhe abgeleitet werden. Für eine genaue Lageposition ist ein flacherer Einfallswinkel günstiger. Wird aus beiden Fehlerkomponenten über den Pythagoras die räumliche Abweichung D abgeleitet (in Skizze 5.32 rot markierte Hypotenuse des Fehlerdreiecks), kürzt sich der Einfallswinkel Θ heraus, so dass D lediglich vom Rangeversatz und vom

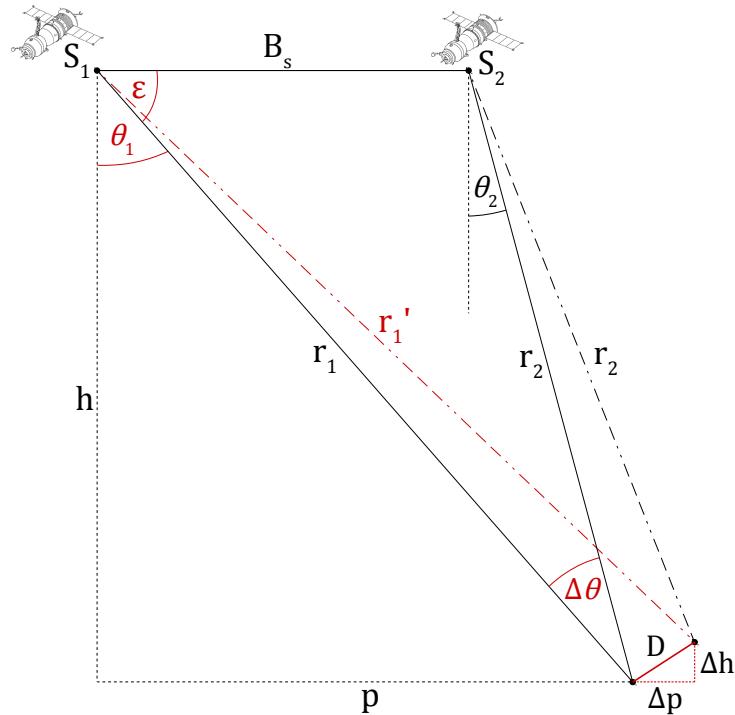


Abb. 5.32: Abhängigkeit des Lagefehlers Δp und Höhenfehlers Δh von Beobachtungs- Θ und Schnittwinkel $\Delta \Theta$. Veränderliche Größen sind rot markiert.

Stereoschnittwinkel abhängig ist:

$$D = \frac{\Delta r}{\sin \Delta \Theta} \quad (18)$$

In Abbildung 5.33 in der rechten Grafik ist diese Unabhängigkeit vom Einfallswinkel durch das Übereinanderliegen aller Kurven verdeutlicht.

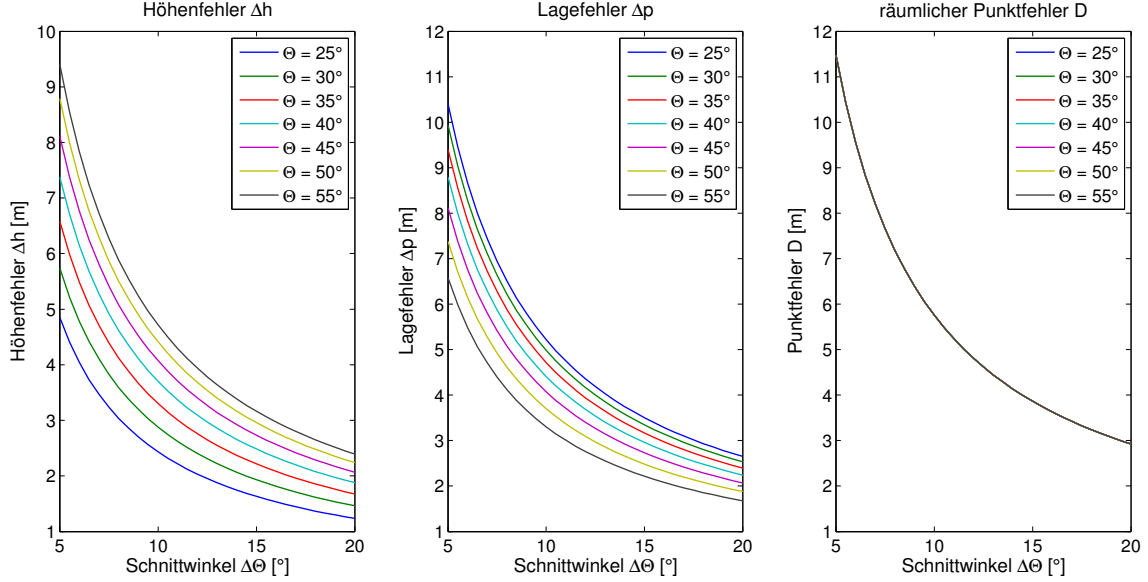


Abb. 5.33: Abschätzung des Lagefehlers Δp und Höhenfehlers Δh sowie des räumlichen Punktfehlers in Abhängigkeit von Beobachtungs- Θ und Schnittwinkel $\Delta\Theta$.

Diese Erkenntnisse lassen sich ebenfalls in der Genauigkeit der abgeleiteten Oberflächenmodelle aus Stereobildern ablesen. In beiden Datensätzen besitzt die Stereokonstellation 1-3 den größten Schnittwinkel (Burgau: gerundet 34° im aufsteigenden und 35° im absteigenden Orbit; Ötztal: gerundet 23° im aufsteigenden und absteigenden Orbit) und liefert Stereohöhenmodelle mit dem geringsten Mittelwert der Höhendifferenzen (das entspricht der größten absoluten Genauigkeit).

Die Fusion der Stereomodelle zu einem Triplet-Oberflächenmodell führt zu einem höheren Informationsgehalt und dadurch zu einer geringeren Anzahl verworfener Punkte. Allerdings hat eine solche Vereinigung eine entsprechende Auswirkung auf die Statistik, da die Genauigkeiten der einzelnen Stereomodelle mit einfließen. Besitzt ein Stereomodel eine ungünstige Geometrie und demnach auch eine geringere Genauigkeit, beeinflusst dies auch die Genauigkeit des fusionierten Oberflächenmodells. Bei den Ötztal-Daten ist die absolute und relative Genauigkeit des Stereomodells aus den Bildpaaren 2-3 des aufsteigenden und des absteigenden Orbits aufgrund des geringen Schnittwinkels ($9,5^\circ$ bei ASC und $10,5^\circ$ bei DSC) wesentlich geringer als die der anderen beiden Bildpaare. Dies drückt jedoch auch die Genauigkeit des fusionierten Oberflächenmodells herab. Um dies zu umgehen, könnten Stereopaare mit ungünstigem Stereowinkel von der Vereinigung ausgeschlossen werden oder ein geringeres Gewicht erhalten. Trotz dieser Fusion stellen steile bis verti-

kale Oberflächenstrukturen und ihre unmittelbare Umgebung Problemzonen dar. In einer Blickrichtung wird das Gelände umgeklappt (*Layover*) und für die andere abgeschattet, so dass für diese Bereiche aus keinem der beiden Datensätze eine sinnvolle 3D-Information abgeleitet werden kann (Raggam et al., 2009).

Werden beide verwendeten Methoden miteinander verglichen, können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Mittelwerte der konventionellen Methode liegen im Bereich zwischen 1 m und 6 m, wogegen sich die Werte der DHM-basierten Registrierung im Bereich von 1,7 m bis 5,4 m befinden. Die Standardabweichung der DHM-basierten Registrierung zeigt leichte Verbesserungen in fast allen Konstellationen.

Die DHM-basierte Registrierung geht speziell auf die geometrischen Verzerrungen bei bergigen Gelände ein. Daher liegt die Vermutung nahe, dass insbesondere diese Bereiche mit einer höheren Genauigkeit rekonstruiert wurden als mit der herkömmlichen Variante. Die bisherige Genauigkeitsuntersuchung schloss allerdings den kompletten Abbildungsbereich ein. Um die neue Methode detaillierter mit der herkömmlichen Methode vergleichen zu können, wurde aus den Referenzdaten die Hangneigung abgeleitet und in Abhängigkeit von der Steigung in fünf Neigungsklassen unterteilt: *flach*, *gemäßigte Neigung*, *mittlere Neigung*, *starke Neigung* und *sehr starke Neigung*. Somit können die Bereiche, die unterschiedlich stark von der Verzerrung beeinflusst werden, separat untersucht werden. Dabei ist zu beachten, dass der Prozentsatz der einzelnen Neigungsklassen am Gesamthöhenmodell unterschiedlich ist. Zu erwarten ist, dass bei (sehr) starker Neigung der *Layover*-Effekt dominant ist und damit an diesen Stellen keine sinnvolle Information abgeleitet werden kann.

Die Abbildung 5.34 zeigt die Klassifizierung der Hangneigungen vom Ötztal in fünf Farben, wobei die warmen Farben die höhere Geländeneigung signalisieren. Für jede Klasse wurden Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzmodelle jeder Konstellation des aufsteigenden und absteigenden Orbits sowie für beide angewandte Prozessierungsmethoden berechnet (Abbildung 5.35). Mit zunehmender Steigung erhöhen sich generell die statistischen Kennzahlen beider Methoden. Bei näherer Betrachtung sticht dieser Trend der Werte für die Stereokonstellationen 1-2 und 1-3 beider Orbits hervor. Bei der Stereokonstellation 2-3 ist das hangabhängige Verhalten dagegen nicht monoton steigend. Hier verbessern sich die Standardabweichungen in den Klassen 2 und 3 und steigen danach wieder an.

Ein Unterschied zwischen beiden Methoden ist nicht klar festzustellen. Abbildung 5.35 zeigt Mittelwerte (jeweils links) und Standardabweichungen (jeweils rechts) von drei ausgewählten Oberflächenmodellen unterschiedlicher Konstellationen. Die grünen Werte repräsentieren die Werte für die DHM-basierte Registrierung und die blauen die konventionelle Methode. In Anhang A.3 werden die Werte aller Oberflächenmodelle präsentiert. Bei der Stereokonstellation 1-3 (Grafik oben) ist die Genauigkeit der DHM-basierten Registrierung in allen Hangneigungsbereichen besser als die der konventionellen Methode. Mit zunehmender Steigung wird die Differenz zwischen den Standardabweichungen beider Me-

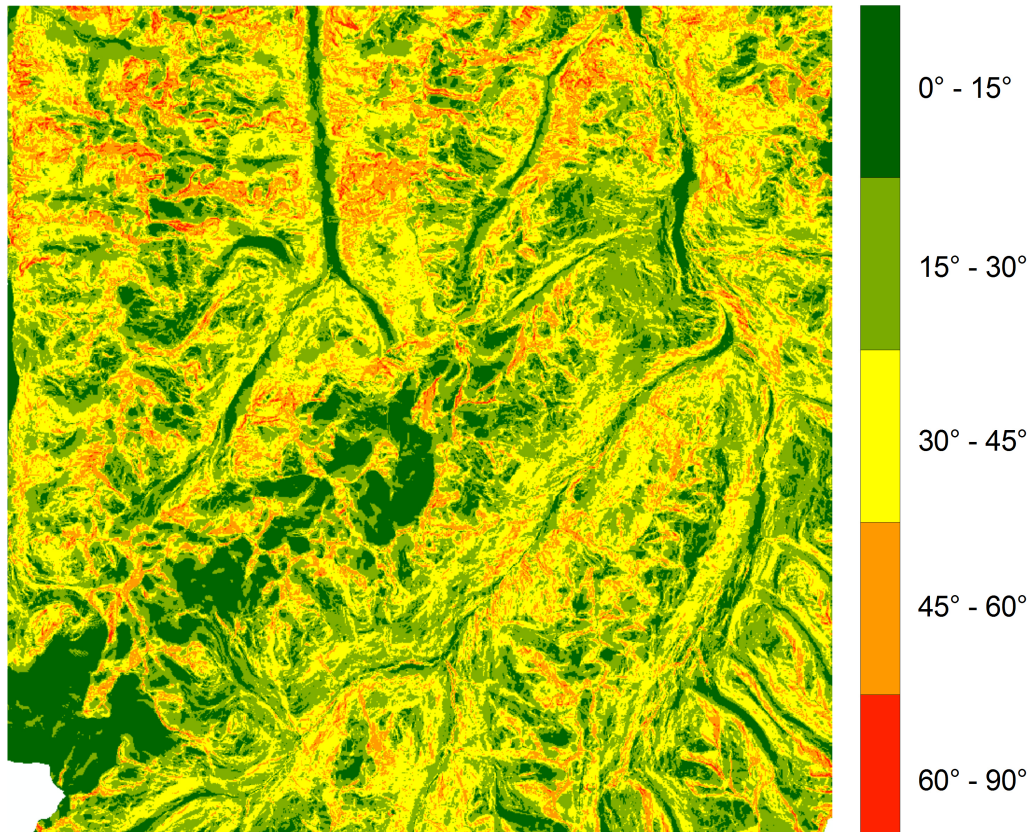


Abb. 5.34: Hangneigungsklassifizierung vom Ötztal. Aus den Referenzdaten wurde für die hangneigungsabhängige Genauigkeitsuntersuchung die Geländeneigung abgeleitet und in fünf Klassen eingeteilt.

thoden größer. Hier tritt der erwartete Effekt für die neue Methode ein: eine Verbesserung der Genauigkeit im bergigen Gelände insbesondere an Berghängen. Dies trifft allerdings nicht für die anderen beiden vorgestellten Konstellationen zu. Bei der mittleren Grafik für die fusionierten Oberflächenmodelle ASC-DSC 1-2 wird die DHM-basierte Registrierung mit zunehmender Steigung schlechter als die konventionelle Methode. Das Oberflächenmodell aus den Bildtripletts beider Orbits zeigt ein ähnliches Verhalten (untere Grafik). Die Mittelwerte aller Konstellationen der Abbildung steigen für die DHM-basierte Registrierung mit den Hangneigungsklassen fast linear an, wohingegen die Mittelwerte der konventionellen Methode für die sehr steilen Bereiche (Klasse 4 und 5) relativ konstant bleiben.

Die Untersuchungen zeigen demnach, dass die neue Methode *DHM-basierte Registrierung* mit den vorhandenen Daten und Einstellungen nicht die erwarteten Verbesserungen mit sich bringt.

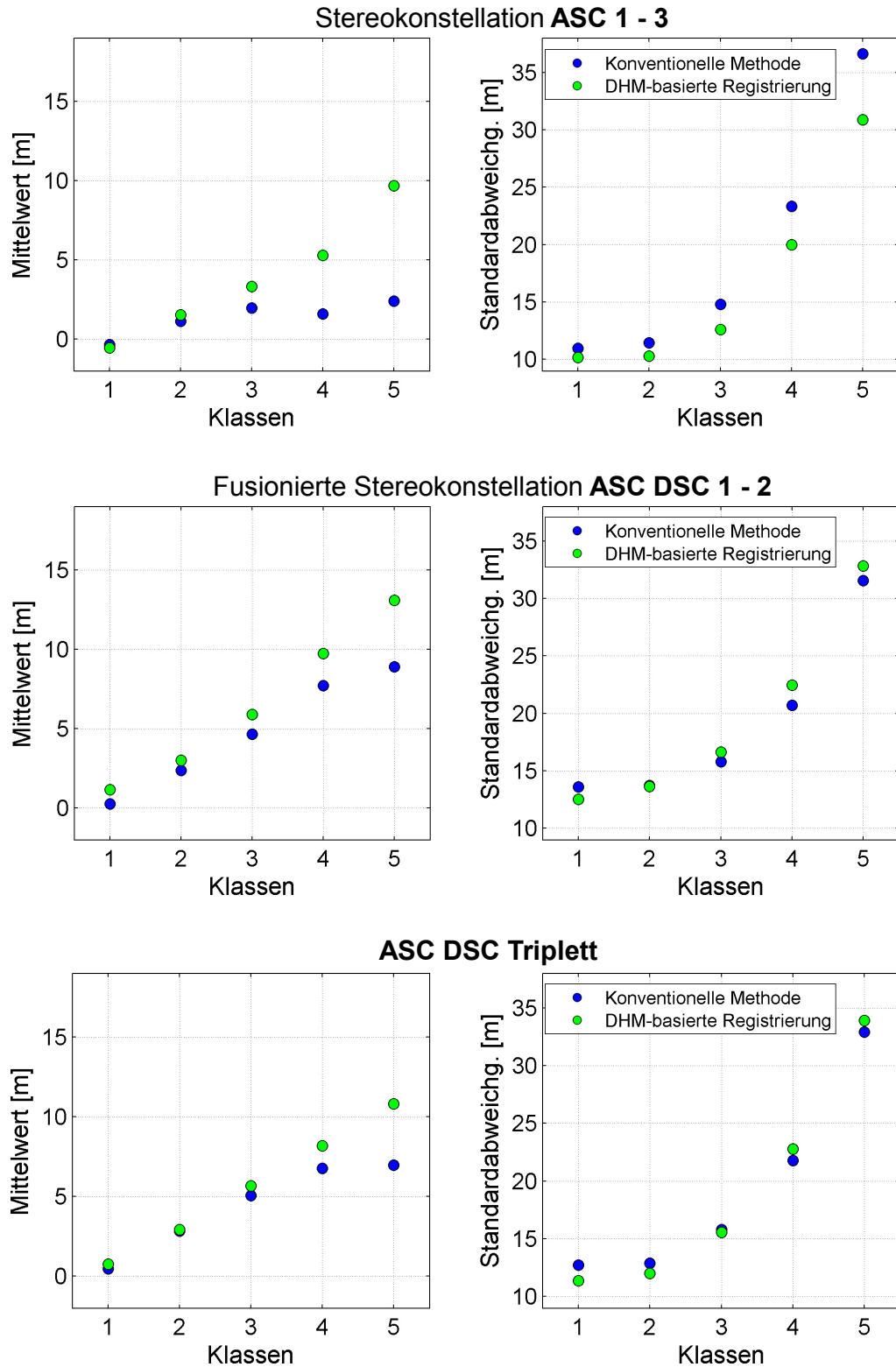


Abb. 5.35: Hangneigungsabhängige Genauigkeitswerte der Oberflächenmodelle von ausgewählten Konstellationen der Öztaldaten. Aus den fünf Hangneigungsklassen wurden Mittelwerte (jeweils links) und Standardabweichung (jeweils rechts) berechnet. Die grünen Werte repräsentieren die Werte für die DHM-basierte Registrierung und die blauen die konventionelle Methode.

Fazit

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schliessen, dass ein mittlerer Einfallswinkel, großer Stereoschnittwinkel sowie eine geringe zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmezeitpunkten die radargrammetrische 3D-Rekonstruktion begünstigen. Beide verwendete Methoden sind geeignet, um digitale Oberflächenmodelle mit einer Genauigkeit im Bereich von 3 - 4 m für Staring SpotLight-Daten und 11 - 12 m für Stripmap-Daten aus SAR-Bildern abzuleiten. Die neue Methode *DHM-basierte Registrierung* bewirkt eine leichte, jedoch nicht signifikante Verbesserung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der radargrammetrischen Auswertung von SAR-Daten ist die Suche nach homologen Punkten in den Bildern, die sogenannte Korrespondenzanalyse, der wichtigste und zugleich der kritischste Arbeitsschnitt. Der Erfolg dieser Korrespondenzanalyse hängt in erster Linie von der Ähnlichkeit des zu prozessierenden Bildpaares ab. Da die spezifischen Verzerrungserscheinungen in den Stereopaaren vom jeweiligen Beobachtungswinkel abhängig sind, unterscheiden sich die Bildstrukturen der Stereopaare teilweise stark. Werden die Bilder in einem Vorverarbeitungsschritt so angepasst, dass sich die Bilder einander ähnlicher werden, kann die Korrespondenzanalyse zuverlässigere Ergebnisse liefern. Die geometrische Verzerrung in Radarbildern wirkt sich lediglich in Richtung der Entfernungscoordinate aus. Daher erscheint eine Skalierung der Bilder in diese Richtung sinnvoll.

In dieser Arbeit wurden zwei Methoden untersucht, die speziell die geometrischen Verzerrungen in den SAR-Bildern berücksichtigt. Bei der ersten Methode wurde bei der Korrespondenzanalyse lediglich das Referenzfenster skaliert und somit bestmöglich auf die Bildstrukturen des Suchfensters angepasst. Des Weiteren wurden die Verwendungen einer multiplikativen, additiven und gewichtet additiven Kombination mehrerer Referenzfenster mit verschiedenen Fenstergrößen untersucht. Die Berechnungen wurden in MatLab implementiert und an simulierten SAR-Daten vom Ötztalgebiet angewendet.

Demgegenüber wurde bei der zweiten Methode die Skalierung nicht auf das Referenzfenster, sondern in einem Schritt auf das gesamte Bild angewendet, allerdings mit lokal unterschiedlichen Skalierungsfaktoren. Die Skalierung findet während der Epipolarrektifizierung statt. Dazu wurde die bisherige Epipolarrektifizierung (Gutjahr et al., 2014) adaptiert. Die Ausgangsbilder werden in diesem Fall nicht auf eine Tangentialebene mit konstanter Höhe des Untersuchungsgebietes projiziert, sondern auf eine Fläche mit angepassten Höhenwerten aus einem Höhenmodell. Diese Variante (DHM-basierte Registrierung) entspricht einer Georeferenzierung der SAR-Bilder.

Für die Machbarkeitsstudie dieser Methode wurden zwei Testdatensätze von TerraSAR-X mit beiden genannten Epipolarrektifizierungsansätzen prozessiert: einerseits hochauflösende Staring SpotLight-Daten vom flachen, ländlichen Gebiet Burgau, andererseits Stipmap-Daten des hochgebirgigen Ötztals. Mit dem Burgaudatensatz konnten Oberflächenmodelle mit einer Genauigkeit von 3-4 m generiert werden. Die Oberflächenmodelle aus den Ötztaldaten besitzen eine Genauigkeit von 11-12 m. Im Vergleich beider Methoden bringt die DHM-basierte Registrierung eine geringe, jedoch nicht signifikante Verbesserung der Genauigkeit der generierten Oberflächenmodelle.

Aus den Ergebnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

6.1 Ansatz 1: Skalierung des Referenzfensters

Eine Verwendung von Referenzfenstern mit unterschiedlichen Größen und die anschließende Kombination der Korrelationsprofile führt zu einer Verbesserung der Disparitäten und somit zu einer erhöhten Punktzuordnung. Dabei stellt sich die multiplikative Methode aufgrund der starken Dämpfung bzw. kompletten Eliminierung der Nebenkeulen als sehr robust heraus.

Die Skalierung des Referenzfensters bewirkt nicht die erwartete Genauigkeitssteigerung, da der Skalierungsfaktor innerhalb des Referenzkerns gerade bei stark kupiertem Gelände sehr stark variiert. Werden die Berechnungen mit mehreren Skalierungsfaktoren k durchgeführt und die beste über eine Maximumsuche selektiert, ist der Rechenaufwand sehr hoch. Wird k aus dem Verhältnis der Bodenauflösungen beider Bilder abgeleitet, entfällt diese Suche und die Rechenzeit wird stark reduziert. Allerdings sollte die bisherige Ableitung von k verbessert werden.

Ausblick

Bei der Implementierung wurde lediglich die WTA-Methode angewendet. Einige Fehldetektionen würden durch die Anwendung des Konsistenztest, der Backmatching-Distanz sowie dem SGM als Stereoalgorithmus eliminiert werden. Des Weiteren könnte die Methode in RSG getestet und die erstellten Oberflächenmodelle auf ihre Genauigkeit untersucht werden. Dabei sollte die Skalierung, ähnlich wie bei Méric et al. (2011) automatisch an die Geländeneigung angepasst werden, um die Rechenzeit zu verringern.

6.2 Ansatz 2: DHM-basierte Registrierung

Die radargrammetrische 3D-Rekonstruktion der Bilder wird generell durch einen mittleren Einfallswinkel, einen großen Stereoschnittwinkel sowie eine geringe zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Bilder begünstigt. Durch die unterschiedlichen Blickrichtungen des Sensors steigert die Fusion der Bilder von verschiedenen Orbits den Informationsgehalt. Dies ist vor allem im Gebirge sinnvoll, da die Berghänge jeweils für die eine Blickrichtung starke Schattenbereiche verursachen. Eine Kombination der Stereo bilder unterschiedlicher Konstellationen bewirkt zum Einen ebenfalls einen Zuwachs an Bildinformationen und zum Anderen eine höhere Punktredundanz. Dadurch können Fehldetektionen aufgedeckt und verworfen werden.

Die DHM-basierte Registrierung bringt lediglich eine geringe, jedoch nicht signifikante Genauigkeitssteigerung der generierten Oberflächenmodelle. Beide verwendeten Methoden sind geeignet, um digitale Oberflächenmodelle mit einer Genauigkeit im Bereich von 3 - 4 m aus Staring SpotLight-Daten und 11 - 12 m aus Stripmap-Daten abzuleiten.

Ausblick

Bei der radargrammetrischen 3D-Rekonstruktion können verschiedene Einstellungen der Parameter getestet werden, um die resultierende Genauigkeit zu erhöhen. Bei der DHM-basierten Registrierung könnten die Korrelationsfenster vergrößert werden, weil die Bilder nicht mehr verzerrt sind. Der Suchbereich kann so stärker eingeschränkt werden, da durch die quasi-Georektifizierung der SAR-Bilder während der Epipolarrektifizierung lediglich *Rest*-Disparitäten ermittelt werden müssen. Der Parameter P_1 des SGM, der geringe Disparitätensprünge von einem Pixel dämpft, könnte erhöht werden, um diese Sprünge stärker zu unterdrücken. Der Ansatz der DHM-basierte Registrierung könnte an Staring SpotLight-Daten vom Hochgebirge getestet werden, da diese Daten weniger Speckle enthalten.

Ferner könnten an die SAR-Daten Korrekturen nach Gisinger et al. (2015) angebracht werden, welche die Einflüsse der Atmosphäre, der Gezeiten- und plattentektonischen Bewegungen berücksichtigen.

Bei einer Fusion von Oberflächenmodellen aus mehr als einem Stereopaar sollten die Konstellationen mit ungünstiger Geometrie eine geringere Gewichtung erhalten oder komplett ausgeschlossen werden.

Akronyme

AOI	Area of Interest
asc	ascending
COSMO-SkyMed	Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin observation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
dsc	descending
DSI	Disparity Space Image
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
GUI	Graphical User Interface - Graphische Nutzeroberfläche
LiDAR	Light Detection and Ranging
MGD	Multilook Ground Range Detected
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCC	Normalized Cross Correlation
Pixel	Picture Element
PPP	Private-Public Partnership
Radar	Radio Detecting and Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RSg	Remote Sensing Software Graz
SAR	Synthetic Aperture Radar
SSC	Single-Look Slant Range Complex

SGM	Semi Global Matcher
SL	Spotlight
SLAR	Sidelooking Airborne Radar
SM	Stripmap
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
ST	Staring Spotlight
TSX	TerraSAR-X
UTM	Universale Transverse Mercatorprojection
WGS	World Geodetic System - geodätisches Referenzsystem

Nomenklatur

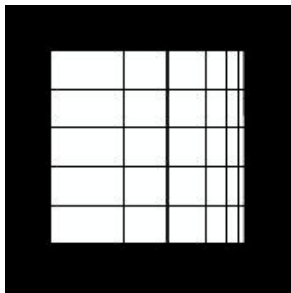
a	Azimut
α	Hangneigung
B	Bandbreite
B_s	Basislinie
c	Lichtgeschwindigkeit
Cov	Kovarianz (Operator)
C	Kosten
$C_{l,r}$	Kamerazentrum
d, D	Disparität, Parallaxe
D	räumlicher Punktfehler
δ_a	Azimutauflösung RAR
$\Delta\alpha$	Abstrahlwinkel
δ_{gr}	Entfernungsauflösung am Boden
δ_r	Schrägentfernungsauflösung
δ_{SAR}	Azimutauflösung SAR
E	Energie
$e_{l,r}$	Epipol
ε	Depressionswinkel
f_D	Dopplerfrequenz
h	Höhe
Δh	Höhenfehler
$I_{1,2}$	Bild 1, Bild 2

λ	Wellenlänge
l	Antennenlänge
$\mathbf{m}, \mathbf{n}$	Bilddimension
Δp	Lagefehler
$\vec{P}_{1,2}$	Objektposition
$P_{1,2}$	Straftherme
$\mathbf{px}$	Pixel
r	Entfernung zwischen Sensor und Empfänger
ρ	Kreuzkorrelationskoeffizient
$\mathbf{S}$	kumulierte Kosten
$\vec{S}_{1,2}$	Sensorposition
$\dot{\vec{S}}_{1,2}$	Sensorgeschwindigkeit
τ	Sendeimpulsdauer
θ	Beobachtungswinkel
θ_a	Winkelauflösung
$\Delta\theta$	Schnittwinkel
$\mathbf{u}, \mathbf{v}$	Bildkoordinaten
$\mathbf{Var}$	Varianz (Operator)
$\mathbf{X}$	Objektpunkt
$x_{l,r}$	Projektion des Objektpunktes in die Bildebene
$X_{l,r}$	Sehstrahl zwischen Objekt und Kamerazentrum

A Anhang

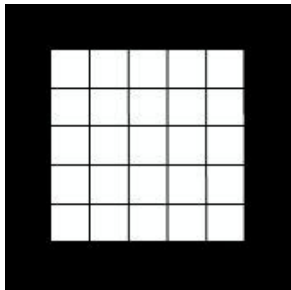
A.1 Begriffserklärungen

SSC - Single Look Slant Range Complex



Das TerraSAR-X SSC-Produkt ist ein *Single-Look*-Produkt des fokussierenden Radarsignals. Die Pixel sind in Azimut- und Schrägentfernungsrichtung äquidistant angeordnet. Die Daten repräsentieren als komplexe Zahlen Amplituden- sowie Phaseninformationen. Jedes Bildpixel ist in Null-Doppler Koordinaten in Entfernungsrichtung prozessiert, d.h. senkrecht zur Flugrichtung.

MGD - Multilook Ground Range Detected



Das TerraSAR-X MGD-Produkt ist ein erfasstes *Multi-Look*-Produkt mit reduziertem Speckle und annähernd quadratischen Auflösungszellen. Die Bildkoordinaten sind entlang der Flugrichtung und der Entfernungsrichtung am Boden orientiert. Der Pixelabstand ist in Azimut- und Bodenentfernungsrichtung äquidistant. Für die Projektion der Schrägentfernung in die Bodenentfernung wurde das WGS84-Ellipsoid und ein mittlerer, konstanter Wert für die Geländehöhe verwendet.

SRTM-Daten

Die *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) ist ein Partnerprojekt zwischen der *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *Agenzia Spaziale Italian* (ASI) sowie des DLR. Das Ziel dieses Projektes war die Erfassung von topografischen Daten von 80% der irdischen Landmasse (zwischen 60° N und 56° S) zur Erstellung einer digitalen dreidimensionalen Weltkarte. Die Datenaufnahme erfolgte innerhalb von 11 Tagen vom 11. - 22.2.2000 mit einem Spaceshuttle, der u.a. mit C-Band- (DLR) und einem X-Band-Interferometrie-SAR (NASA) ausgestattet war. Mithilfe interferometrischer Auswertungen wurden digitale Höhenmodelle (DHM) der Erdoberfläche mit einer geometrischen Auflösung von 30 m bzw. 90 m erstellt.

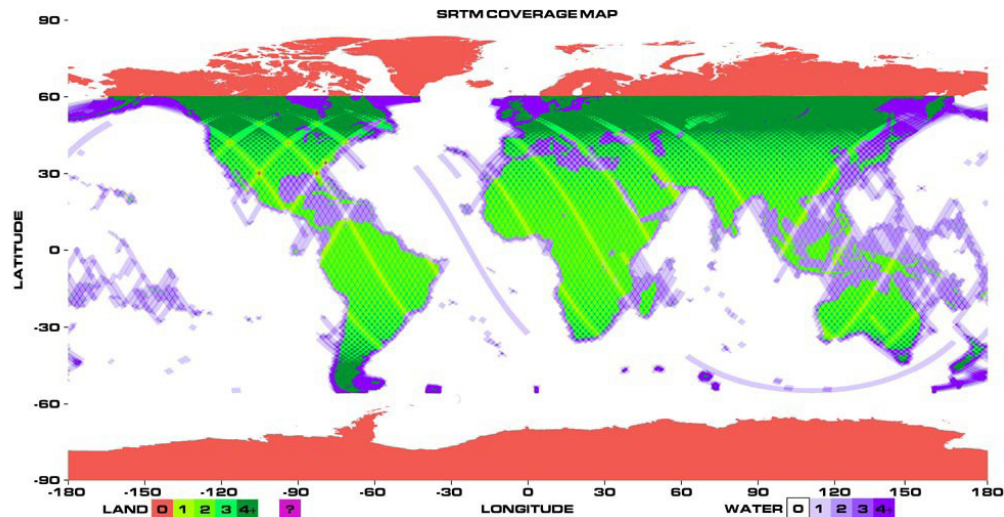


Abb. A.1: Abdeckung der Erdoberfläche durch die SRTM-Daten [NASA]. Die Farben der Schwade repräsentieren, wie oft dieses Gebiet von SRTM überflogen und aufgenommen wurde. Für Landgebiete ist die Einmalaufnahme grün, zweimalige Aufnahme ist gelb-grün usw. (Legende unten links). Über dem Wasser ist der Farbcode in Blautönen gehalten (Legende unten rechts). Rote Gebiete konnten nicht abgebildet werden.

Die Genauigkeit der von der NASA generierten DHM liegt im Bereich der *Digital Terrain Elevation Data* (DTED; deutsch Digitale Geländeerhebungsdaten) Stufe 1 Genauigkeit (geschätzt 10 bis 15 m). Die Genauigkeit des von der DLR abgeleiteten DHM ist geringfügig besser (geschätzt 6 bis 10 m), deckt allerdings nur Teile der Landesfläche ab (Toutin und Gray, 2000). Die NASA bietet zwei Datensätze unterschiedlicher Auflösung an. Die Daten SRTM 1 besitzen eine Auflösung von 1 Bogensekunde, was für Bereiche am Äquator eine Bodenauflösung von 30 m ergibt. Die SRTM 3 Daten, die mittels einer Mittelbildung aus den SRTM 1 Daten entstanden sind, haben eine Auflösung von 3 Bogensekunden, was einer Bodenauflösung von 90 m in Äquatornähe entspricht. In Tabelle A.1 sind die Metadaten von SRTM des deutschen und des amerikanischen SAR sowie die Genauigkeiten der jeweils daraus abgeleiteten DHM gegenübergestellt.

Tab. A.1: Metadaten der SRTM-Daten des deutschen und des amerikanischen SAR sowie die Genauigkeit der jeweils daraus abgeleiteten DHM [DLR, 2000].

	X-Band (DLR)	C-Band (NASA)	C-Band (NASA)
Auflösung	1 Bogensekunde (DTED-2)	1 Bogensekunde (DTED-2)	3 Bogensekunden (DTED-1)
Schwadbreite	bis zu 50 km	225 km	225 km
geometrische Auflösung	< 30 m	< 30 m	< 90 m
absolute Höhengenaugkeit	< 16 m	< 16 m	< 16 m
relative Höhengenaugkeit	< 6 m	< 10 m	< 10 m

A.2 Ergebnisse vom Ansatz *Adaption des Referenzfensters* mit Schwellwerten

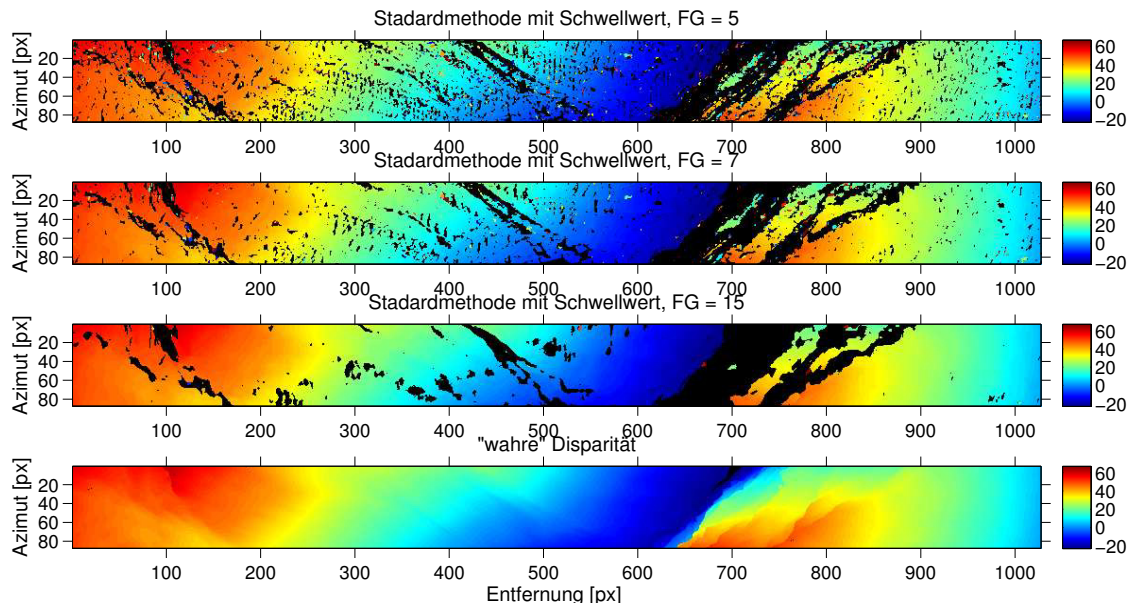


Abb. A.2: Disparitäten der Standardmethode: keine Skalierung und mit fester Referenzfenstergröße (5x5 oben, 7x7 mittig und 15x15 unten) unter Anwendung von Schwellwerten. Die schwarzen Bereiche sind die verworfenen, ungültigen Pixel.

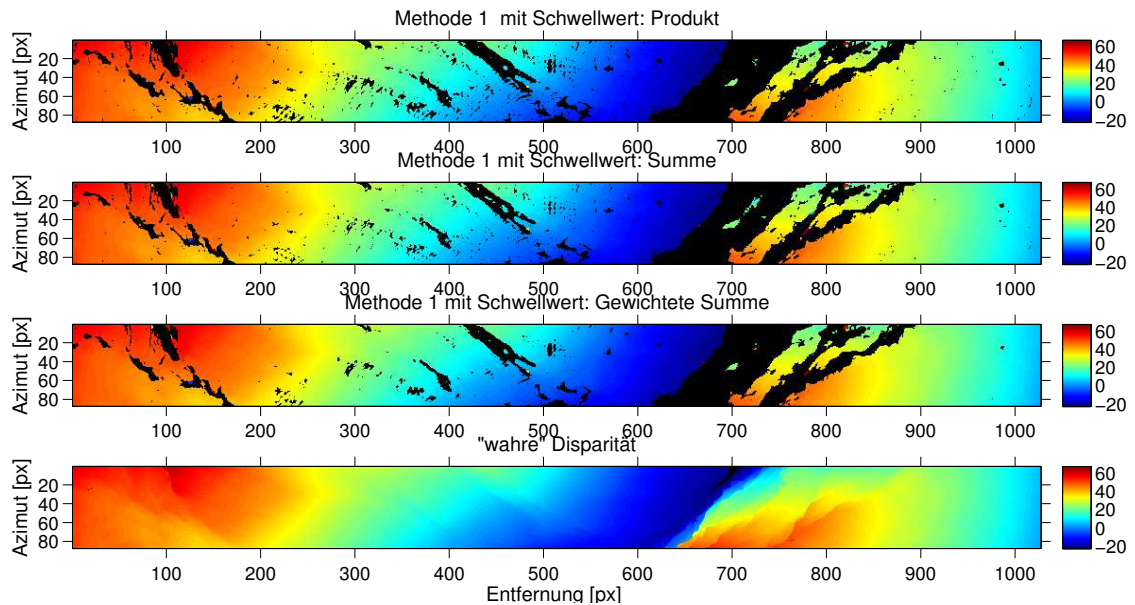


Abb. A.3: Disparitäten der Methode 1: keine Skalierung und mit Kombination der Korrelationsprofile (Produkt oben, Summe mittig und gewichtete Summe unten) unter Anwendung von Schwellwerten. Die schwarzen Bereiche sind die verworfenen, ungültigen Pixel.

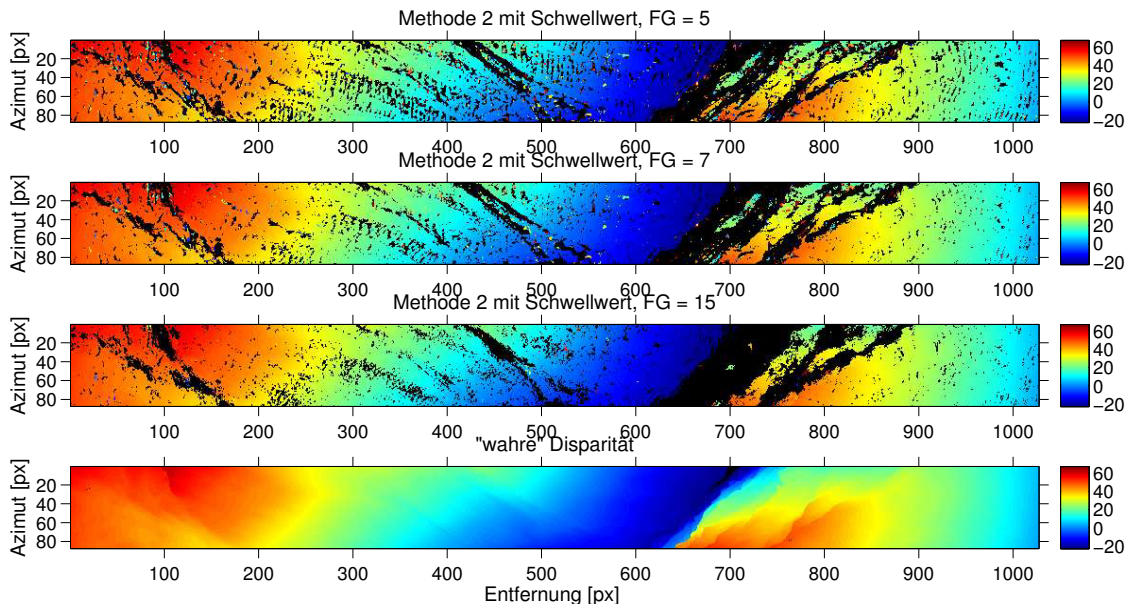


Abb. A.4: Disparitäten der Methode 2: mit Skalierung und fester Referenzfenstergröße (5x5 oben, 7x7 mittig und 15x15 unten) unter Anwendung von Schwellwerten. Die schwarzen Bereiche sind die verworfenen, ungültigen Pixel.

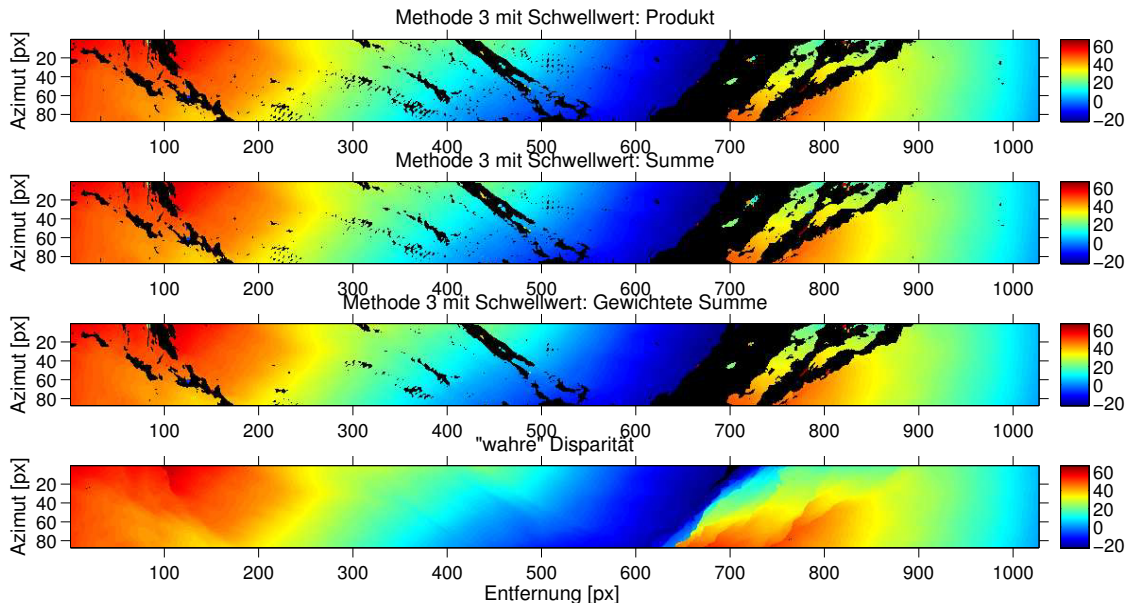


Abb. A.5: Disparitäten der Methode 3: mit Skalierung und Kombination der Korrelationsprofile (Produkt oben, Summe mittig und gewichtete Summe unten) unter Anwendung von Schwellwerten. Die schwarzen Bereiche sind die verworfenen, ungültigen Pixel.

A.3 Hangneigungsabhängige Genauigkeiten

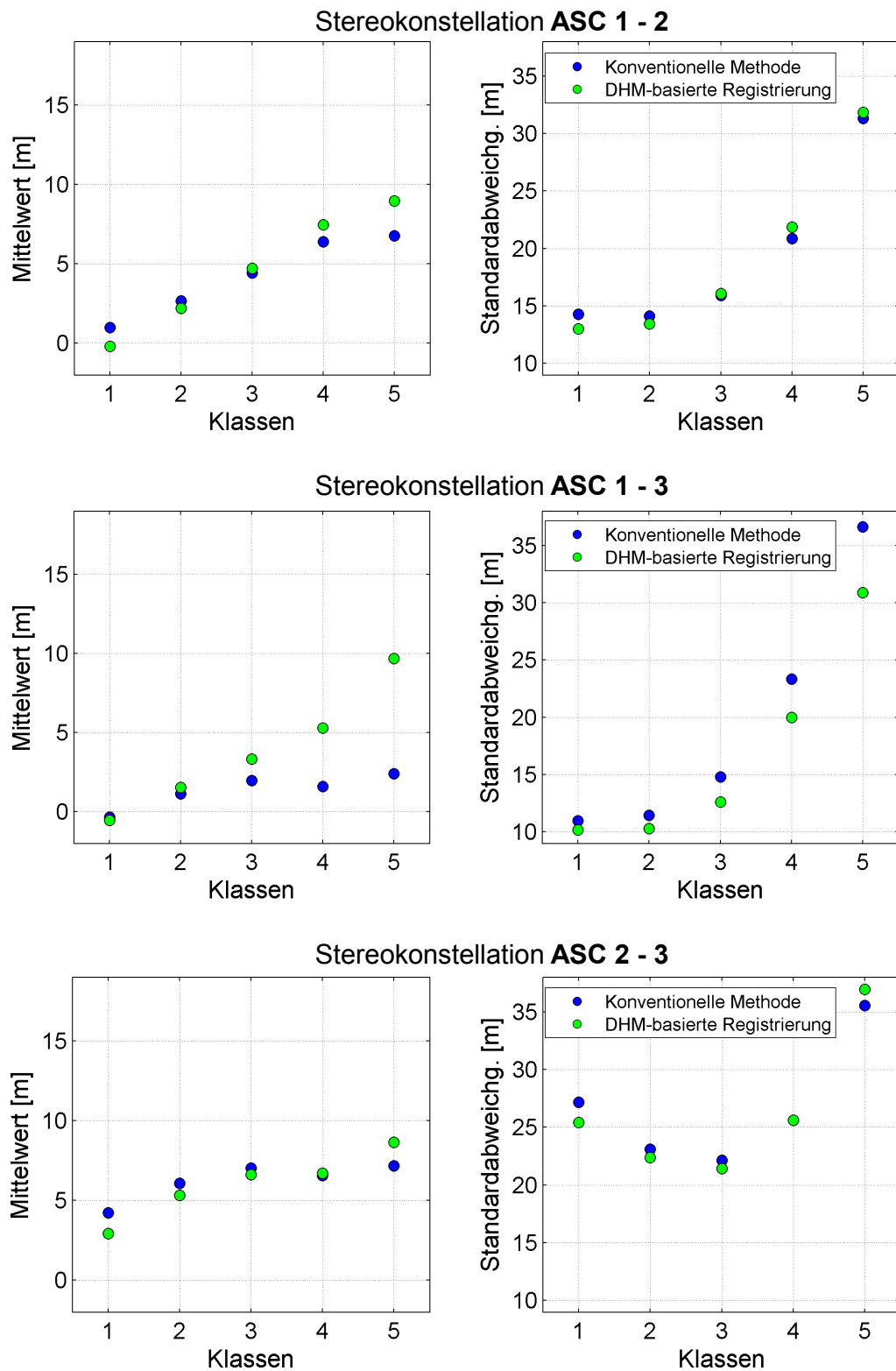


Abb. A.6: Hangneigungsabhängige Genauigkeitswerte der Oberflächenmodelle des aufsteigenden Orbits der Öztaldaten. Aus den fünf Hangneigungsklassen wurden Mittelwerte (jeweils links) und Standardabweichung (jeweils rechts) berechnet. Die grünen Werte repräsentieren die Werte für die DHM-basierte Registrierung und die blauen die konventionelle Methode.

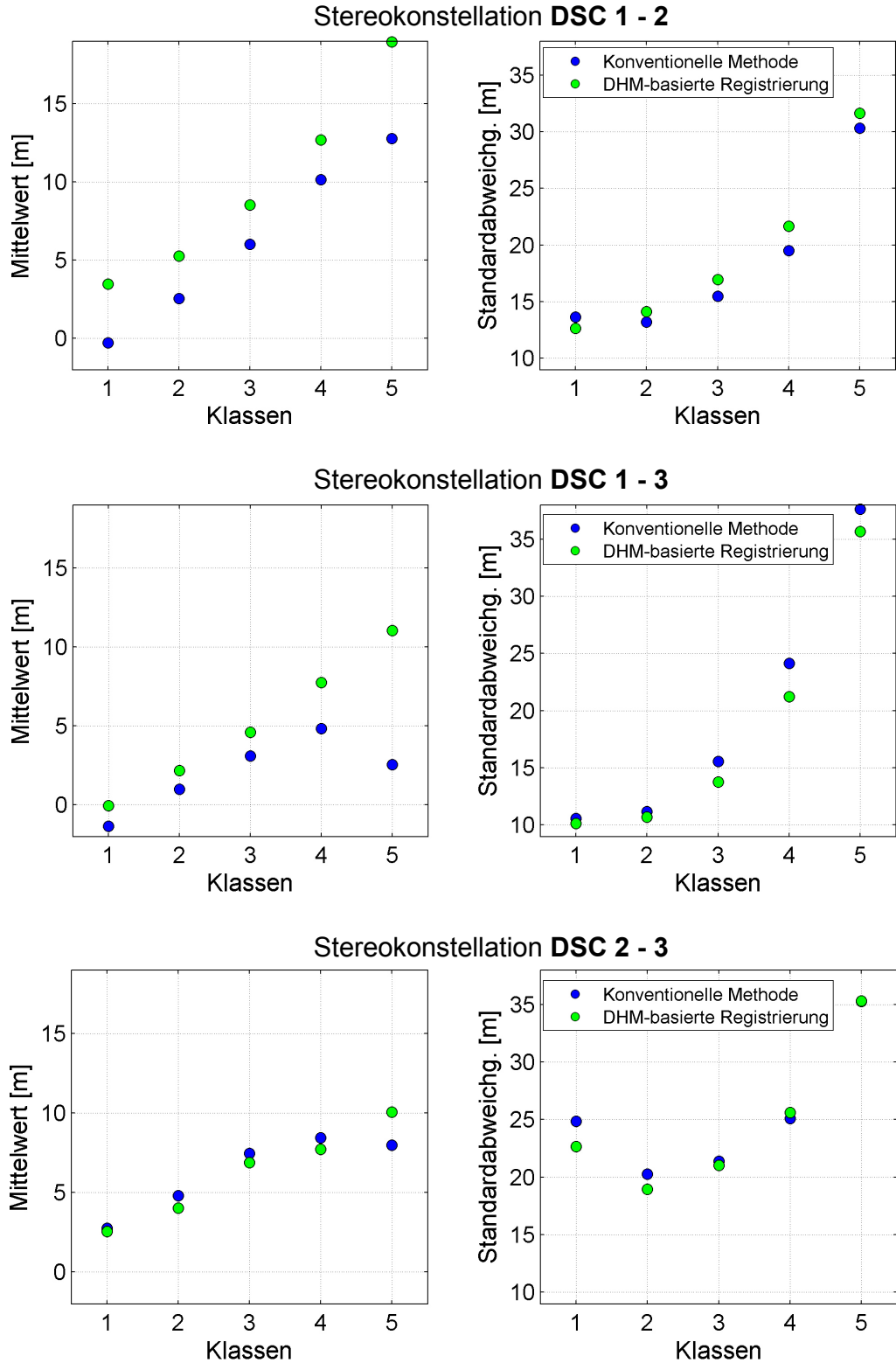


Abb. A.7: Hangneigungsabhängige Genauigkeitswerte der Oberflächenmodelle des absteigenden Orbits der Öztaldaten. Aus den fünf Hangneigungsklassen wurden Mittelwerte (jeweils links) und Standardabweichung (jeweils rechts) berechnet. Die grünen Werte repräsentieren die Werte für die DHM-basierte Registrierung und die blauen die konventionelle Methode.

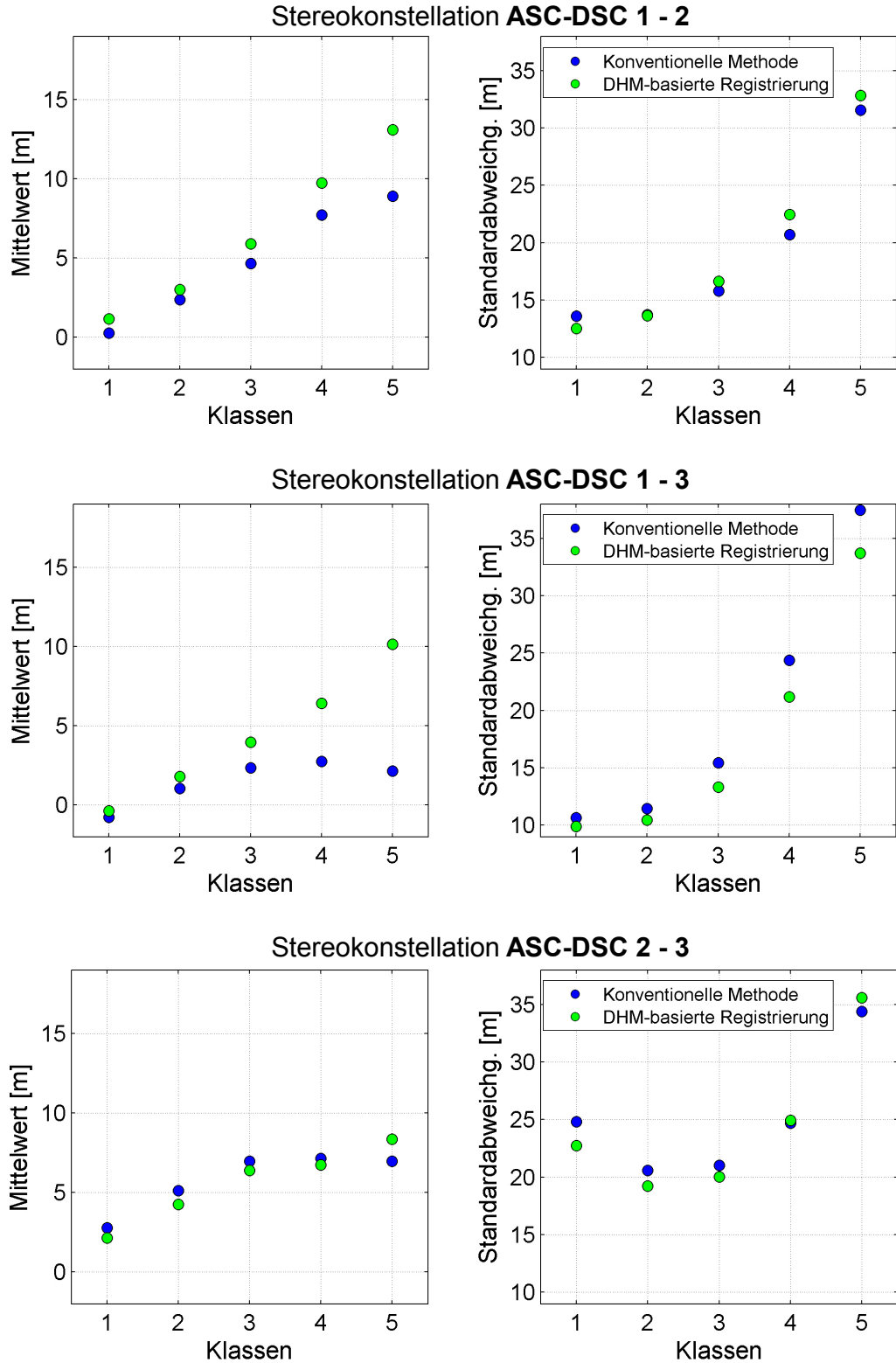


Abb. A.8: Hangneigungsabhängige Genauigkeitswerte der Oberflächenmodelle des auf- und absteigenden Orbits der Öztaldaten. Aus den fünf Hangneigungsklassen wurden Mittelwerte (jeweils links) und Standardabweichung (jeweils rechts) berechnet. Die grünen Werte repräsentieren die Werte für die DHM-basierte Registrierung und die blauen die konventionelle Methode.

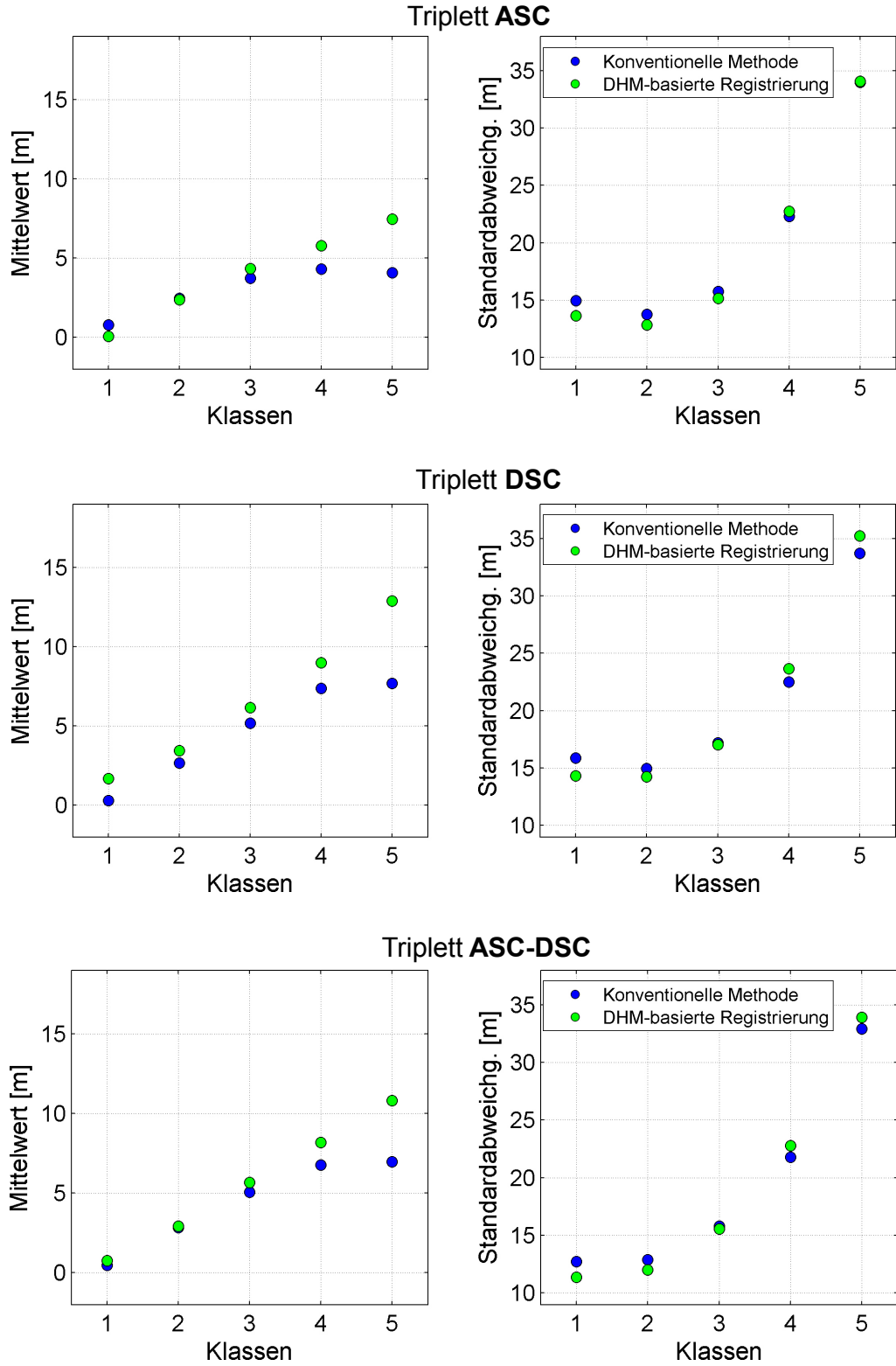


Abb. A.9: Hangneigungsabhängige Genauigkeitswerte der Oberflächenmodelle aus Bildtriplets der Öztal-
taldaten. Aus den fünf Hangneigungsklassen wurden Mittelwerte (jeweils links) und Standardabweichung
(jeweils rechts) berechnet. Die grünen Werte repräsentieren die Werte für die DHM-basierte Registrierung
und die blauen die konventionelle Methode.

Literaturverzeichnis

- ALBERTZ J. (2009): *Einführung in die Fernerkundung*, Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 4. Auflage, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- ANANDAN P. (1989): *A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion*. International Journal of Computer Vision 2 (3), S. 283–310.
- BALDENHOFER K.G. (2015): *Lexikon der Fernerkundung*. <http://www.fe-lexikon.info/index.htm>. Bearbeitungsstand: 8. Mai 2015.
- BALZ T., ZHANG L., LIAO M. (2013): *Direct stereo radargrammetric processing using massively parallel processing*. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 79, S. 137–146.
- CAPALDO P., CRESPI M., FRATARCANGELI F., NASCETTI A., PIERALICE F. (2011): *High-resolution SAR radargrammetry: a first application with COSMO-SkyMed spotlight imagery*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 8 (6), S. 1100–1104.
- FRÖBA B., ERNST A. (2004): *Face Detection with the Modified Census Transform*. IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition.
- GISINGER C., BALSS U., PAIL R., ZHU X.X., MONTAZERI S., GERNHARDT S., EINEDER M. (2015): *Precise Three-Dimensional Stereo Localization of Corner Reflectors and Persistent Scatterers With TerraSAR-X*. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 53, No. 4.
- GUTJAHR K.-H., PERKO R., RAGGAM H., SCHARDT M. (2014): *The Epipolarity Constraint in Stereo-Radargrammetric DEM Generation*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 52, No. 8.
- GUTJAHR K.-H., PERKO R., RAGGAM H., SCHARDT M. (2015): *3D-Mapping From TerraSAR-X Staring Spotlight Data*. IGARRS 2015.
- HIRSCHMÜLLER H. (2005): *Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information*. In: Proc. CVRP, volume 2, S. 807–814.
- HIRSCHMÜLLER H. UND SCHARSTEIN D. (2008): *Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences*. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence.

- JÄHNE B. (2012): *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*, 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- KLAUSING H., HOLPP W. (Hrsg.) (2000): *Radar mit realer und synthetischer Apertur*, Konzeption und Realisierung. München, Wien: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- LEBERL F. W. (1978): *Satellitenradargrammetrie*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften: Reihe C, Dissertationen; Nr. 239, 156 Seiten, München: Verl. d. Bayer. Akad. d. Wiss.
- LEBERL F. W., DOMIK G., RAGGAM J., CIMINO J, KOBRICK M. (1986): *Multiple incidence angle SIR-B experiment over argentina: stereo-radargrammetric analysis*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 24 (4), S. 482 – 491.
- LEBERL F. W. (1990): *Radargrammetric Image Processing*. Artech House remote sensing library, Norwood: Artech House.
- LEBERL F. W. (1998): *Radargrammetry*. In: HENDERSON, F. M. & LEWIS, A. J. (Hrsg.): *Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing*, 3rd Ed., 2, S. 183 – 269.
- LONGUET-HIGGINS H. C. (1981): *A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections*. Nature 293, S. 133 – 135.
- MÉRIC S., FAYARD F., POTTIER É. (2011): *A Multiwindow Approach for Radargrammetric Improvements*. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 49, NO. 10.
- NASCETTI A. (2013): *High resolution radargrammetry: development and implementation of an innovative image matching strategy*. Dissertation, Rom.
- PERKO R. (2004): *Computer Vision For Large Format Digital Aerial Cameras*, Dissertation, Technische Universität Graz.
- PERKO R., RAGGAM H., DEUTSCHER J., GUTJAHR K., SCHARDT M. (2011): *Forest Assessment Using High Resolution SAR Data in X-Band*. In: Remote Sensing 2011, 3, S. 792 – 815.
- RAGGAM H., PERKO R., GUTJAHR K. (2009): *Automationsgestützte Herleitung von 3D-Information aus hochauflösenden SAR-Bilddaten*. In: Vermessung & Geoinformation 3/2009, S. 343 – 352.
- RAGGAM H., GUTJAHR K., PERKO R., SCHARDT M. (2010): *Assessment of the stereo-radargrammetric mapping potential of TerraSAR-X multibeam spotlight data*. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48 (2), S. 971 – 977.
- REINKE N. UND WERNINGHAUS R. (2009): *TerraSAR-X. Das deutsche Radar-Auge in All*. Missionsbroschüre. DLR, Bonn.

- RUMPLER M., WENDEL A., BISCHOF H. (2013): *Probabilistic range image integration for DSM and true-orthophoto generation*. In: Scandinavian Conference on Image Analysis, S. 533–544.
- SCHWÄBISCH M., XU C., GRIFFITHS S., LUMSDON P., ZHANG Q., MERCHER B. (2009): *Radar-grammetrische Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen aus hochauflösenden SAR-Daten*. Online: www.agit.at/php_files/myagit/papers/2009/7485.pdf, www.agit.at/php_files/myagit/papers/2009/7485.pdf.
- SCHREER O. (2005): *Stereoanalyse*, In: *Stereoanalyse und Bildsynthese*, Springer Berlin Heidelberg, S. 125–174.
- SÖRGEL, U. (2006): *Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung*. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 263 (Festschrift „125 Jahre Geodäsie und Geoinformatik“), S. 295–302, Hannover.
- STORMBERG J. (2011): *Rektifizierung von Freihand-Stereo-Aufnahmen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- TOUTIN T., CHÉNIER R. (2009): *3-D Radargrammetric Modeling of RADARSAT-2 Ultrafine Mode: Preliminary Results of the Geometric Calibration*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 6 (2), S. 282–286.
- TOUTIN T., GRAY L. (2000): *State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data*. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 55. S. 13–33.
- WANG W., HU F., LI J. (2011): *Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolarity model*, ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing, Vol. 66, No. 3, S. 347–355.
- WOLFF C. (1998): *Radartutorial*. <http://www.radartutorial.eu/>
- ZHANG ZHENGYOU (1998): *Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty: A Review*. International Journal of Computer Vision, 27(2), S. 161–198 (1998), Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in The Netherlands.
- ZHENGHAO SHI, KO B. FUNG (1994): *A Comparison of Digital Speckle Filters*. Proceedings of IGARSS 94, August 8-12, 1994, S. 2129–2133.
- ZABIH R. UND WOODFILL J. (1994): *Non-parametric Local Transforms for Computing Visual Correspondance*. In: Proceedings of the European Conference of Computer Vision, Stockholm, Sweden, May 1994, S. 151–158.

Internetadressen

[DLR, 2000]: [http:](http://www.caf.dlr.de/dlr/presse/archiv/sonderseiten/srtm/genauigkeit.htm)

[//www.caf.dlr.de/dlr/presse/archiv/sonderseiten/srtm/genauigkeit.htm](http://www.caf.dlr.de/dlr/presse/archiv/sonderseiten/srtm/genauigkeit.htm),
Stand 06.11.2010

[GeoDZ]: **GeoDataZone**. Das Lexikon der Erde. <http://www.geodz.com>, Autorin:
Arisleidy Stolzenberger-Ramirez, Stand 26.08.2015

[SEOS]: **Science Education through Earth Observation for High Schools
Project**. <http://www.seos-project.eu/home.html>, Stand 25.08.2015

[NASA]: Bildnachweis.

http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/images/bin/srtm_covmap_hi.jpg, Stand
08.01.2016