



Automationsgestützte Herleitung von 3D-Information aus hochauflösenden SAR-Bilddaten

Hannes Raggam, Roland Perko und
Karlheinz Gutjahr, Graz

Kurzfassung

Im Juni 2007 wurde die erste deutsche Raumfahrtmission TerraSAR-X gestartet. Dieser SAR-Sensor kann im Spotlight-Aufnahmemodus hochauflösende Bilddaten mit einer Bodenauflösung von 1 Meter aufnehmen, wobei die Aufnahme unter verschiedenen Aufnahmewinkeln erfolgen kann. Diese Umstände eröffnen neue Perspektiven zur Prozessierung von SAR-Stereo-Bildpaaren und versprechen in diesem Zusammenhang ein hohes Genauigkeitspotential. Im aktuellen Beitrag wird dieses Potential für ausgewählte Testgebiete und Fallbeispiele näher durchleuchtet. Die verwendeten Methoden zur Generierung von Oberflächenmodellen werden aufgezeigt und beispielhaft auf TerraSAR-X Stereodaten angewandt. Die erzielten Ergebnisse und erstellten Produkte werden durch Vergleich mit verfügbaren Referenzdaten validiert.

Schlüsselwörter: TerraSAR-X, Sensormodell, Genauigkeitsanalyse, Stereo-Radargrammetrie, Oberflächenmodell.

Abstract

In June 2007 the first German space mission TerraSAR-X was launched. In the Spotlight mode, this SAR sensor can acquire high-resolution image data at a pixel resolution of about 1 meter, moreover operating at different off-nadir viewing angles. These characteristics open new perspectives for SAR stereo data processing, proposing a high accuracy potential in this context. In this paper this potential is analyzed for selected test sites and test cases. The methods being used to generate surface models are presented and applied to TerraSAR-X stereo data sets. The achieved results as well as generated products are validated by comparison to available reference data.

Keywords: TerraSAR-X, sensor model, accuracy analysis, stereo-radargrammetry, surface model.

1. Einleitung

Die deutsche TerraSAR-X-Mission wurde im Juni 2007 gestartet. Mit diesem vielseitigen und hochauflösenden X-Band SAR-Sensor wurde quasi ein neues Zeitalter der SAR-Fernerkundung eröffnet. SAR-Bildprodukte können im ScanSAR-, Stripmap- und Spotlight-Modus aufgenommen werden, wobei letztere eine hohe Bildpunktauflösung von nominell 1 Meter bieten [1]. Aus geometrischer Sicht ist darüber hinaus die Möglichkeit, Bilddaten unter verschiedenen Off-Nadir-Blickwinkeln aufzunehmen, von Bedeutung.

Diese Umstände führten – zumindest am Institut für Digitale Bildverarbeitung – zu einer Wiederbelebung der Prozessierung von SAR-Stereobilddaten, da aus derartigen Bildpaaren berechtigterweise Genauigkeiten wie zuvor nie dagewesen erwartet werden können. Stereotaugliche Langzeit-SAR-Missionen vor der TerraSAR-X Ära waren lediglich die kanadische Radarsat- oder die europäische Envisat-Mission, welche allerdings Daten mit wesentlich schlechterer Bildpunktauflösung lieferten. Für erstere wurden im Rahmen des „Applications Development and Research Opportunity“-Programms der kanadischen Raumfahrtagentur entsprechende Stereo-Experimente durchgeführt [2].

Mittlerweile wurden auch zwei alternative SAR-Missionen mit vergleichbarer Charakteristik gestartet. Dies sind die italienische COSMO-SkyMed SAR-Mission¹⁾, im Rahmen welcher vier X-Band SAR-Sensoren simultan betrieben werden, sowie die kanadische Radarsat-2-Mission²⁾ mit einem C-Band SAR und einer Bildpunktauflösung von bis zu 3 Metern.

Die Stereo-Radargrammetrie ist ein traditionelles Betätigungsfeld am Institut. Demzufolge wurden auch für TerraSAR-X entsprechende Untersuchungen hinsichtlich des Stereo-Potentials dieser Daten lanciert. Im Rahmen der Beteiligung am „Science-Programm“ des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurden TerraSAR-X Daten für ausgewählte, vorwiegend österreichische Testgebiete akquiriert. Im gegenständlichen Rahmen werden hiervon ausgewählte Daten von 2 Testgebieten verwendet, um die 2D- wie auch die 3D-Geolokalisierungsgenauigkeit von TerraSAR-X Daten zu untersuchen. Beispiele zur 3D-Rekonstruktion und Generierung von Oberflächenmodellen aus unterschiedlichen Stereo-Dispositionen werden aufgezeigt. Neben

1) Homepage of COSMO-SkyMed: <http://www.cosmo-skymed.it>

2) Homepage of Radarsat-2: <http://www.radarsat2.info>

der Stereodaten-Prozessierung wird in den gegenständlichen Untersuchungen auch die Möglichkeit der Verwendung von mehr als einem Bildpaar zur 3D-Rekonstruktion sowie der damit verbundene Benefit aufgezeigt. Eine Validierung der generierten Oberflächenmodelle wurde durch visuellen und ansatzweise durch numerischen Vergleich mit den verfügbaren Referenzdaten durchgeführt.

2. Testgebiete, Testdaten und Referenzdaten

2.1 TerraSAR-X Bilddaten

Für einige ausgewählte österreichische Testgebiete wurden verschiedene TerraSAR-X Bilddaten im Spotlight-Modus bestellt. Hierbei war ein Fokus auf bewaldete Gebiete und Waldanwendungen ausgerichtet. Generell können im Spotlight-Modus Bild-Triplets, also drei unter unterschiedlichen Off-Nadir-Aufnahmewinkeln aufgenommene Szenen im „Full-Performance-Range“ akquiriert werden. Eine schematische Darstellung eines derartigen Aufnahmeszenarios zeigt Abbildung 1. Im gegenständlichen Zusammenhang werden die nachstehend beschriebenen Testgebiete und Testdatensätze verwendet.

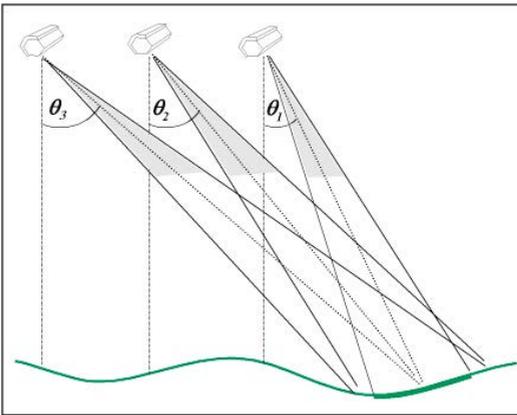


Abb. 1: Aufnahmeszenario der TerraSAR-X Spotlight-Daten

Testgebiet „Burgau“: Dieses ländliche Gebiet deckt landwirtschaftliche wie auch bewaldete Flächen ab und zeigt flaches und leicht hügeliges Gelände mit Geländehöhen im Bereich von 270 bis 445 Metern. Für diese Untersuchungen wurden ein Triplet von MGD-Produkten (multi-look ground range detected) aus dem Zeitraum März 2008 sowie ein Triplet von SSC-Produkten (single-look slant-range complex), aus dem Zeitraum Juni 2008 verwendet.

Die Bilddaten wurden vom aufsteigenden (ascending/ASC) Orbit aufgenommen und die

Zuordnung zu den unterschiedlichen Off-Nadir-Blickwinkeln erfolgt in weiterer Folge durch die Bezeichnungen ASC1, ASC2 und ASC3. Ein Anaglyphenbild in Form einer Überlagerung der SSC-Szenen ASC3 und ASC1 in rot bzw. grün zeigt die Abbildung 2.

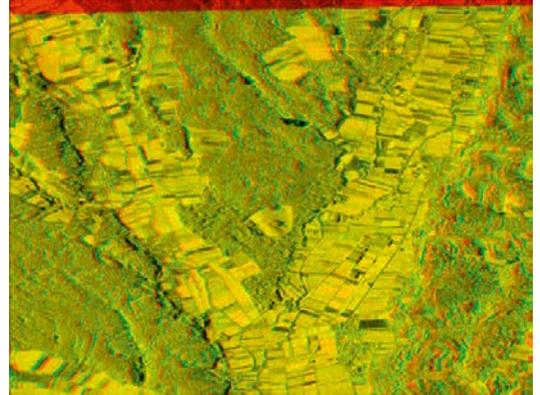


Abb. 2: TerraSAR-X SSC Anaglyphenbild (Burgau)

Testgebiet „Baernbach“: Dieses Gebiet zeigt eine bergige Charakteristik mit Geländehöhen im Bereich von 430 bis 1150 Metern. Es umfasst ländliche Bereiche mit ausgedehnter Waldbedeckung. Das Testgebiet wurde im Jänner 2008 von schweren Sturmschäden erfasst und wurde u.a. aus diesem Grund heraus ausgewählt. Jeweils drei MGD Spotlight-Szenen wurden vom aufsteigenden wie auch vom absteigenden (descending/DSC) Orbit im Zeitraum Oktober 2008 akquiriert. Diese beiden Triplets werden in weiterer Folge mit ASC1, ASC2 und ASC3 bzw. DSC1, DSC2 und DSC3 den unterschiedlichen Off-Nadir-Blickwinkeln zugeordnet. Ein Anaglyphenbild in Form einer Überlagerung der MGD-Szenen ASC3 und ASC1 in rot bzw. grün zeigt die Abbildung 3.

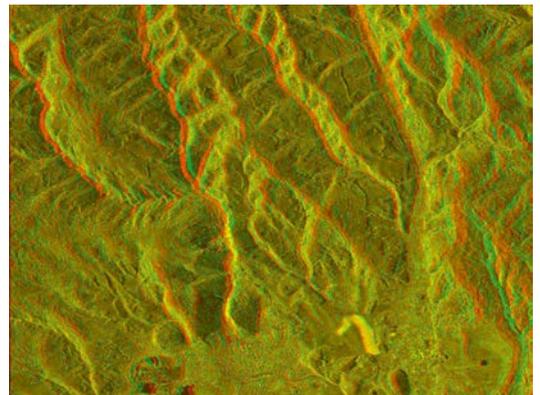


Abb. 3: TerraSAR-X MGD Anaglyphenbild (Baernbach)

Sämtliche Bildprodukte wurden mit dem „Science-Orbit“, also der genauesten verfügbaren Flugbahn-Information bestellt.

2.2 Passpunkte

Eine Reihe von lage- und höhenmäßig verteilten Passpunkten (GCPs) wurde für die beiden Testgebiete gemessen, um

- die Qualität der initialen TerraSAR-X Sensormodelle zu validieren,
- diese Sensormodelle durch Least-Squares Ausgleichsverfahren zu verbessern bzw. adaptieren und
- die aus Stereopaaren oder Triplets erzielbare 3D-Genauigkeit zu analysieren.

Die Lagekoordinaten der Passpunkte wurden aus Ortho-Photos (Pixelgröße 1 Meter) gemessen, während die Höhen aus dem für diese Zwecke verfügbaren BEV-Höhenmodell (Maschenweite 10 Meter) abgegriffen wurden. Natürliche Objekte wie Straßenkreuzungen, Wasserflächen oder Feldgrenzen wurden als Passpunkte verwendet. Wie in Abbildung 4 anhand einer Straßenkreuzung gezeigt wird, sind solche Objekte weder im TerraSAR-X Bild noch im Referenz-Ortho-Photo pixelgenau lokalisierbar und es kann durchaus mit einer Lokalisierungsunsicherheit in der Größenordnung von 1 bis 2 Pixel gerechnet werden. Weiters ist zu bedenken, dass auch weder die Ortho-Photos noch das Referenz-DHM absolut lage- bzw. höhengenaue sind und auch hier durchaus der eine oder andere Meter an Passpunkt-Ungenauigkeit induziert werden kann.

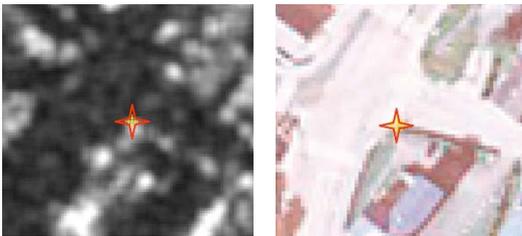


Abb. 4: Passpunktmessung an einer Straßenkreuzung im TerraSAR-X Bild (links) und im Ortho-Photo (rechts)

3. Validierung und Optimierung des TerraSAR-X Sensormodells

3.1 TerraSAR-X Sensormodell

Ein gängiger Ansatz zur Abschätzung der Geolokalisierungs-genauigkeit besteht in der Berechnung von Punktresiduen der Azimut- und Range-Bildkoordinaten (in und quer zur Flugrichtung) mittels einer Rückwärtstransformation der zuge-

hörigen Kartenkoordinaten. Für diese Transformation wird das aktuelle physikalische Sensormodell verwendet. Das seitens des Instituts für Digitale Bildverarbeitung implementierte Sensormodell basiert auf den gängigen Range- und Dopplergleichungen [3]. In diese mussten den Spezifikationen des DLR folgend einige TerraSAR-X spezifische Notwendigkeiten eingearbeitet werden, wie zum Beispiel die Berücksichtigung der atmosphären-bedingten Verzögerungen für die Laufzeitmessungen sowie die Verwendung von Polynomen bis zur 5. Ordnung zur Konvertierung von SAR-Schrägdistanzen auf Grunddistanzpixel (slant-to-ground-range). Die Stimmigkeit mit dem seitens des TMSP-Prozessors des DLR vorgegebenen Sensormodell wurde anhand eines mit den Daten mitgelieferten Kontrollpunktgitters [1] geprüft und ergab eine Übereinstimmung im verschwindenden Subpixel-Bereich.

Dies ist auch eine Grundvoraussetzung für die Rolle des Instituts im Rahmen des kommerziellen Vertriebs von TerraSAR-X Produkten seitens Infoterra Deutschland, für welchen das Institut Software zur Generierung sogenannter wertveredelter (value-added) TerraSAR-X Produkte beisteuert [4].

3.2 A-priori Geolokalisierungs-genauigkeit

Seitens des DLR gibt es eine Untersuchung mittels Corner-Reflektoren, welche naturgemäß eine hohe Identifizier- und Messgenauigkeit im SAR-Bild garantieren [5]. In dieser wird die Geolokalisierungs-genauigkeit für TerraSAR-X Spotlight-Produkte in der Größenordnung von weniger als einem Meter angegeben.

Für die Abschätzung der Geolokalisierungs-genauigkeit der vorliegenden Testdaten mussten natürliche Objekte verwendet werden. In der Regel wurden mehr als 20 Passpunkte gemessen. Für die verwendeten Testdaten sind die RMS-Werte und Mittelwerte der mit dem initialen Sensormodell errechneten Azimut- und Range-Punktresiduen in der Tabelle 1 zusammengefasst. Auf den ersten Blick übersteigen die über die RMS-Werte interpretierbaren Lagegenauigkeiten die Angaben des DLR. Die initialen RMS-Werte sind in der Größenordnung von einem bis zu 3 Pixel, und im Falle der DSC-Daten von „Baernbach“ sogar bis zu 6 Pixel. Darüber hinaus ist aus den Mittelwerten der Residuen ein erheblicher systematischer Fehleranteil mit einer ähnlichen Streuung abzulesen. In früheren Untersuchungen mit anderen Testgebieten und Daten konnten ähnliche Effekte beobachtet werden [6].

Zum einen können diese Punktlagefehler durch die Ungenauigkeiten der für die Passpunktmes-
sungen verwendeten Referenzdaten hervorgerufen
werden worauf beispielsweise die relativ kon-
stanten Residuen-Mittelwerte der Burgau-SSC
Daten schließen ließen. Die Streuung der RMS-
und Mittelwert-Residuen der Baernbach-Daten
legt aber zusätzlich den Verdacht nahe, dass
auch die Sensormodelle dieser Daten nicht im-
mer den DLR-Genauigkeitsspezifikationen ent-
sprechen und diese insbesondere bei der Auf-
nahme der DSC-Daten nicht erfüllt sind.

3.3 Modell-Optimierung

Ein Least-Squares Parameterausgleich wurde auf
die TerraSAR-X Sensormodelle angewandt, um
diese zu optimieren bzw. mit den Referenzdaten
konsistent zu machen. Untersuchungen haben
hierbei ergeben, dass der Ausgleich auf die Azi-
mut- und Rangeparameter eingeschränkt werden
kann, während der „Science-Orbit“ ausreichend
genau scheint. Für SSC-Produkte umfassen die-
se Parameter lineare Beziehungen zwischen den
physikalischen Zeitmessungen in Azimut/Range
sowie den Spalten/Zeilen-Pixelkoordinaten, also
je 2 bzw. in Summe 4 Parameter für den Para-
meterausgleich. Für MGD-Produkte ist hingegen
ein Polynom 5. Ordnung, also 6 Parameter, für
die Konvertierung der Range-Laufzeitmessung
in eine Pixelcoordinate zu berücksichtigen, was
in 8 auszugleichenden Parametern resultiert.

Durch den Parameterausgleich werden zumin-
dest allfällige systematische Fehler des Sensor-
modells eliminiert. Die RMS-Werte, der sich nach
dem Ausgleich (a-posteriori) ergebenden Punkt-
residuen, sind ebenfalls in der Tabelle 1 ange-
führt. Diese sind nunmehr in Azimut wie auch in
Range in der Größenordnung eines Pixels. Hier

erschöpfen sich auch die Genauigkeitsaussagen
bedingt durch die generelle Lokalisierungs- und
Mess-ungenauigkeit der Passpunkte.

In diversen Ausgleichs-Experimenten wurde
auch festgestellt, dass die SSC-Produkte be-
dingt durch die Einschränkung auf 4 auszuglei-
chende Parameter ein sehr robustes Verhalten
zeigen, was den Passpunktbedarf deutlich senkt.
Im Gegensatz dazu zeigen die MGD-Produkte
und das für diese auszugleichende Polynom 5.
Ordnung ein sehr instabiles Verhalten, welches
die Verfügbarkeit einer ausreichend großen und
speziell in Range-Richtung ausgewogen verteil-
ten Anzahl von Passpunkten erfordert.

4. Abschätzung des 3D-Genauigkeits- potentials

Die Passpunkte wurden grundsätzlich in 2 oder 3
Bildern der Tripletts gemessen. Aus diesen Mes-
sungen können mittels eines auf Least-Squares
beruhenden räumlichen Vorwärtsschnitts die
Boden-(Karten-)Koordinaten berechnet werden.
3D Punktresiduen ergeben sich in weiterer Folge
im Vergleich zu den gemessenen Kartenkoordin-
aten. Dies wurde für die einzelnen Stereo-Mo-
delle wie auch für die Tripletts der verwendeten
Datensätze gemacht. Die RMS-Werte der für
Ost-, Nord- und Höhenkoordinaten resultieren-
den Punktresiduen sind in Tabelle 2 zusammen-
gefasst. Weiters ist in der Tabelle der jeweilige
Stereo-Schnittwinkel bzw. das „Winkel-Spektrum“
als maßgeblicher Parameter angeführt.

Die RMS-Werte können als Repräsentativwer-
te für die mittels TerraSAR-X Stereo-Bildpaaren
oder Tripletts erreichbare 3D Rekonstruktions-
genauigkeit angesehen werden und führen zu
folgenden Rückschlüssen:

Testdaten	Szene	Off-Nadir (Θ)	Pixel- Größe (m)	GCPs	RMS initial		Mw initial		RMS opt.	
					Az	Rg	Az	Rg	Az	Rg
Burgau MGD	ASC1	22.4°	1.25	23	1.04	2.03	-0.50	0.40	0.81	1.18
	ASC2	37.3°	1.50	23	1.34	1.61	-0.87	-0.43	1.02	1.02
	ASC3	48.6°	1.50	23	1.00	1.53	-0.34	-0.48	0.78	0.71
Burgau SSC	ASC1	22.2°	—	22	0.94	1.38	-0.17	-0.86	0.75	0.82
	ASC2	37.2°	—	22	0.85	1.79	-0.16	-1.56	0.68	0.68
	ASC3	48.5°	—	22	1.08	3.03	-0.17	-0.86	0.85	0.64
Baernbach MGD ASC	ASC1	30.5°	0.75	34	1.51	2.20	-0.56	1.27	0.98	1.28
	ASC2	43.5°	0.75	46	2.15	2.08	-0.08	0.78	1.01	1.09
	ASC3	53.2°	0.75	46	1.71	1.90	-0.77	-1.08	0.78	0.80
Baernbach MGD DSC	DSC1	28.9°	1.00	26	1.62	6.58	-1.30	6.20	0.93	0.83
	DSC2	42.3°	0.75	32	0.87	5.64	0.34	5.49	0.67	1.04
	DSC3	52.3°	0.75	36	1.15	5.12	0.57	4.97	0.97	0.93

Tabelle 1: A-priori und a-posteriori-Analyse der 2D-Geolokalisierungsgenauigkeit der TerraSAR-X Spotlight-Daten

Testdaten	Modell/Triplett	Stereo-Schnittwinkel $\Delta\theta$ (°)	GCPs	RMS (m)			
				Ost	Nord	Höhe	I3DI
Burgau MGD	ASC1 – ASC2	14.9	20	3.06	1.12	1.55	3.61
	ASC2 – ASC3	11.3	23	3.79	1.03	3.65	5.37
	ASC1 – ASC3	26.2	20	1.63	0.94	1.06	2.17
	ASC Triplett	14.9 + 11.3	23	1.50	0.86	1.07	2.03
Burgau SSC	ASC1 – ASC2	15.0	22	1.78	1.65	1.33	2.77
	ASC2 – ASC3	11.3	22	3.08	1.92	2.98	4.69
	ASC1 – ASC3	26.3	22	1.42	1.71	1.30	2.57
	ASC Triplett	15.0 + 11.3	22	1.31	1.61	1.33	2.46
Baernbach MGD ASC	ASC1 – ASC2	15.0	34	1.98	0.70	1.38	2.34
	ASC2 – ASC3	11.3	46	2.37	0.62	2.79	3.71
	ASC1 – ASC3	26.3	34	1.13	0.47	1.03	1.61
	ASC Triplett	15.0 + 11.3	44	1.33	0.51	1.30	1.93
Baernbach MGD DSC	DSC1 – DSC2	13.4	25	1.50	0.48	0.99	1.86
	DSC2 – DSC3	10.0	32	2.01	0.64	2.23	3.07
	DSC1 – DSC3	23.4	26	1.18	0.60	0.83	1.56
	DSC Triplett	13.4 + 10.0	31	1.41	0.46	1.39	2.03

Tabelle 2: Ergebnisse der 3D-Genauigkeitsanalyse der TerraSAR-X Spotlight-Daten

- Die 3D Geolokalisierungsgenauigkeit steigt generell mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel und ist demzufolge für die Bildpaare, welche sich aus den Bildern ASC1/ASC3 bzw. DSC1/DSC3 zusammensetzen und den größten Stereo-Schnittwinkel abdecken, am höchsten.
- Für diese Stereo-Paare sind die individuellen RMS-Fehler in der Größenordnung von bis zu 1.5 Metern, und jene der Residuenlängen in der Größenordnung von 2 bis 2.5 Metern.
- Für kleine Stereo-Schnittwinkel, wie zum Beispiel etwas über 10 Grad für die ASC2/ASC3-Bildpaare, ist die 3D Geolokalisierungsgenauigkeit deutlich schlechter und führt zu RMS-Punktresiduen bis zu 5 Metern.
- Die Bild-Triplets decken den gleichen Off-Nadir-Winkelbereich wie die Stereopaare ASC1/ASC3 bzw. DSC1/DSC3 ab und ergeben demzufolge auch in etwa die gleiche Geolokalisierungsgenauigkeit.

Grundsätzlich sind diese prognostizierten Genauigkeiten durchaus akzeptabel, insbesondere wenn man die Sensitivität eines Fehlers in der Range-Bildkoordinate berücksichtigt. Ein solcher führt generell zu einem Fehler der Schrägdistanz und weiterführend zu einem Range-Versatz Δr . Wie bereits von anderen Autoren, wie z.B. [7], aufgezeigt, schlägt sich ein solcher Fehler nach

folgenden Beziehungen in einem entsprechenden Lagefehler Δp und einem Höhenfehler Δh wie folgt zu Buche:

$$\Delta p = \Delta r \cdot \cos \Theta_1 / \sin \Delta \theta$$

$$\Delta h = \Delta r \cdot \sin \Theta_1 / \sin \Delta \theta$$

Es ist offensichtlich, dass bei einem kleinen Stereo-Schnittwinkel $\Delta \theta$ auch der Nenner dieser Beziehungen klein wird und resultierende Lage- und Höhenfehler unmittelbar ein Vielfaches eines Schrägdistanzfehlers Δr ausmachen können.

5. Methoden zur Oberflächenrekonstruktion

5.1 Prozessierung von Stereo-Daten

Basierend auf den physikalischen Sensormodellen für die TerraSAR-X Bilddaten werden in der Regel die folgenden Prozessierungsschritte zur Erstellung eines Oberflächenmodells aus Stereo-Bildpaaren angewandt:

- Grobregistrierung** eines der beiden Bilder in Bezug auf seinen Stereo-Partner.
- Bild-Matching** (oder Bild-Korrelation) zum automatischen Auffinden einander entsprechender Bildpunkte.
- Räumlicher Vorwärtsschnitt** zur Berechnung der zugehörigen Bodenkoordinaten.
- Oberflächenmodell-Erstellung** durch Interpolation eines regelmäßigen Höhenrasters aus den errechneten Bodenkoordinaten.

5.2 Bild-Matching

Ein gängiges Matching-Kriterium basiert auf dem Kreuzkorrelations-Koeffizienten. Dieses wurde auch für die gegenständlichen Untersuchungen in einer erweiterten Form angewandt. Dem Matching liegt ein hierarchischer Algorithmus basierend auf einer Bildpyramide [8,9] mit den folgenden Prozessierungsschritten zu Grunde: (1) Prädiktion mittels der Sensormodelle und einem groben Höhenmodell (z.B. SRTM); (2) Normalisierte Kreuzkorrelation im reduzierten Suchbereich sowie Subpixel-Interpolation; (3) Elimination von Ausreißern; (4) Interpolation für diese Bereiche und (5) Übertragung der Matching-Ergebnisse auf die nächste Pyramidenbene.

5.3 Verwendung von mehreren Matching-Ergebnissen

Am Institut für Digitale Bildverarbeitung wurden ursprünglich für optische Daten Methoden für den räumlichen Vorwärtsschnitt entwickelt, welche auch mehr als ein Matching-Ergebnis verwenden können [10]. Diese wurden nunmehr für SAR-Bilddaten adaptiert und sind von Relevanz, wenn eine Abdeckung durch mehr als zwei Bilder vorliegt, wie es für die gegenständlichen Testdatensätze auch der Fall ist. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass für das Matching "benachbarte" Bildpaare verwendet werden können, welche üblicherweise die größte Ähnlichkeit haben, was eine optimale Matching-Performance garantiert. Die Mehrfach-Matching-Ergebnisse werden in weiterer Folge im räumlichen Vorwärtsschnitt quasi zusammengeführt, decken dadurch ein erweitertes Schnittwinkel-Spektrum ab und garantieren somit auch beste geometrische Robustheit für die Berechnung der Bodenkoordinaten.

Durch die erhöhte Überbestimmung des Vorwärtsschnitts besteht auch die Möglichkeit, fehlerhafte Matching-Ergebnisse in der angewandten Least-Squares Methode zu erkennen und zu eliminieren. Die dadurch entstehenden Lücken können bei Bedarf durch geeignete Interpolationsverfahren im Zuge der Oberflächenmodell-Generierung wieder aufgefüllt werden.

5.4 Ascending/Descending Oberflächenmodellfusionierung

In bergigem Gelände zeigen SAR-Bilddaten in Abhängigkeit des Blickwinkels vielfach reduzierten Informationsgehalt durch die SAR-spezifischen Abbildungseffekte der Pixel-Kompression (foreshortening), der Pixel-Überlagerung (layover) oder der Abschattung (shadow). Dies sind

speziell Bereiche, wo das Bild-Matching versagt und vermehrt fehlerhaft agiert. Resultierende Oberflächenmodelle sind demnach in diesen Bereichen ebenfalls fehlerhaft oder zumindest lückenhaft, falls die Matching-Fehler im Zuge des Vorwärtsschnittes eliminiert werden können.

Die Verwendung von Bilddaten des „ascending“ und des „descending“ Orbits sowie die Fusionierung von daraus hergeleiteten Oberflächenmodellen kann zu einem Gutteil Abhilfe schaffen. Die Grundidee hierbei ist, die fehler- und lückenhaften Bereiche eines dieser Oberflächenmodelle durch die allenfalls vorhandene Höheninformation des anderen Oberflächenmodells zu ersetzen. In dem am Institut für Digitale Bildverarbeitung verwendeten Ansatz wird als Fusionierungskriterium vorzugsweise das Maximum des lokalen SAR-Einfallswinkels verwendet, welches in der Regel die Information der dem Sensor jeweils abgewandten Hänge (Back-Slopes) priorisiert.

Anzumerken ist auch, dass trotz dieser Fusionierung steile (vertikale) Oberflächenstrukturen, wie z.B. Waldränder oder Gebäudefassaden, und deren unmittelbare Umgebung Problemzonen darstellen. Für eine Blickrichtung besteht hier der Layover-Effekt und für die andere der Shadow-Effekt. Somit kann für solche sensible Bereiche aus keinem der beiden Datensätze eine sinnvolle 3D-Information hergeleitet werden.

6. Erstellung von Oberflächenmodellen

Die vorhin skizzierten Methoden zur Oberflächenrekonstruktion wurden auf die Daten der beiden Testgebiete angewandt. Für die einzelnen Stereo-Bildpaare wurde zunächst das Matching durchgeführt, und die Matching-Ergebnisse von einzelnen wie auch von Mehrfach-Bildpaaren dem räumlichen Vorwärtsschnitt wie im vorigen Abschnitt aufgezeigt unterworfen. Im Zuge dessen wurden unzuverlässige bzw. unstimmmige Matching-Ergebnisse durch Berücksichtigung relativ strenger Residuen-Schwellwerte innerhalb der Least-Squares Berechnung der Bodenkoordinaten verworfen.

Die Tabelle 3 zeigt den Prozentsatz der verworfenen Punkte für sämtliche prozessierten Stereo-Paare und Bild-Triplets. Die numerischen Werte bestätigen zunächst, dass die Zuverlässigkeit des Matching mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel abnimmt, da für das Bildpaar 1-3 weitgehend die meisten Punkte verworfen werden. Das entspricht der grundsätzlichen Erwartungshaltung, da die geometrische Ähnlichkeit der Bildpaare und damit die Matching-Perfor-

mance grundsätzlich mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel abnehmen. Eine Ausnahme bildet der MGD-Datensatz des Testgebietes „Burgau“. Bei diesem zeigt das Bild ASC2 in Vergleich zu den Bildern ASC1 und ASC3 radiometrische Unterschiede, welche offensichtlich die Qualität der Matching-Ergebnisse der Bildpaare 1-2 bzw. 2-3 erheblich degradieren. Im Gegensatz dazu zeigt der SSC-Datensatz beispielsweise eine deutlich homogenere Radiometrie, und damit verbunden einen sehr niedrigen Prozentsatz verworfener Punkte im Bild-Triplett. Grundsätzlich ist zu sehen, dass durch die Verwendung der Matching-Ergebnisse des Triplets eine deutliche Optimierung, sprich Reduktion der verworfenen Punkte, erzielt werden kann.

Weiters fällt auf, dass in den Bildpaaren 1-2 und 1-3 des DSC-Datensatzes von „Baernbach“ ein sehr hoher Prozentsatz von Matching-Ergebnissen verworfen wird. Hier zeigt das Bild DSC1 deutlich stärkere abbildungsspezifische und topographiebedingte Bildverzerrungen als die anderen Bilder, welche auf das Zusammenspiel von kleinem Off-Nadir-Winkel und ungünstiger (schräge) Exposition des Geländes in Bezug zum TerraSAR-X-Sensor zurückzuführen ist.

Testdatensatz	Stereomodell			Triplett
	1-2	2-3	1-3	1-2-3
Burgau MGD	39.2	29.6	31.1	19.3
Burgau SSC	26.3	24.0	30.3	7.0
Baernbach ASC	35.6	33.9	37.3	16.8
Baernbach DSC	53.9	29.8	58.0	18.8

Tabelle 3: Prozentsatz der im räumlichen Vorwärtsschnitt verworfenen Punkte

In weiterer Folge wurden aus den Ergebnissen des räumlichen Vorwärtsschnittes Oberflächenmodelle mit einer Ausgabe-Pixelgröße von 2 Metern erstellt. Abbildung 5 zeigt die aus den drei Stereomodell-Kombinationen des SSC-Datensatzes von „Burgau“ generierten Oberflächenmodelle in grauwert-kodierter Darstellung, wobei hier die durch Punktverwerfung entstehenden „Löcher“ beibehalten wurden. Der Zusammenhang zwischen Stereo-Schnittwinkel und Anteil der verworfenen Punkte, d.h. der schwarzen Oberflächenmodellbereiche, wird hier visuell klar verdeutlicht.

Ein aus dem Bildpaar ASC2-ASC3, welches die beste Matching-Performance zeigt, hergeleitetes Oberflächenmodell, in welchem diese Löcher aufgefüllt wurden, ist in Abbildung 6 (links) dargestellt. Alternativ zeigt diese Abbildung in der mittleren und rechten Illustration das aus

dem Bild-Triplett hergeleitete Oberflächenmodell, einerseits noch mit Löchern behaftet und andererseits nach Interpolation dieser Löcher. Wie zu sehen ist, resultiert aus dieser Konstellation ein wesentlich geringerer Anteil an verworfenen Punkten mit der Folge, dass eine Interpolation der nunmehr vergleichsweise kleinen Lücken vertrauenswürdiger möglich ist. Weiters zeigt das zuiinterpolierte Oberflächenmodell wesentlich weniger Rauschen als das aus dem Stereomodell hergeleitete Oberflächenmodell. Dies belegt über die Tabelle 3 hinaus die Sinnhaftigkeit der Verwendung von mehr als zwei Bildern zur 3D Rekonstruktion und bestätigt, dass unter solchen Rahmenbedingungen fehlerhafte Matching-Ergebnisse doch zu einem erheblichen Anteil erkannt und eliminiert werden können.

Für das Testgebiet „Baernbach“ wurden zunächst in adäquater Weise Oberflächenmodelle aus den Stereo-Bildpaaren bzw. den Bild-Triplets der Bilder des aufsteigenden bzw. des absteigenden Orbits erstellt. Für die aus den Stereo-Bildpaaren hergeleiteten Oberflächenmodelle gilt grundsätzlich bereits vorhin Gesagtes: Die Matching-Performance nimmt mit zunehmendem Stereo-Schnittwinkel ab und damit der Anteil der im räumlichen Vorwärtsschnitt verworfenen Punkte zu. Zusätzlich spielt für hier auch die bergige Charakteristik dieses Testgebiets eine Rolle. Fehlerhafte Matching-Ergebnisse bzw. daraus resultierende Lücken des Oberflächenmodells treten verstärkt auf den „Foreslopes“, also den dem Sensor zugeneigten Hängen auf, wo die SAR-Abbildungseffekte des „Foreshortening“ bzw. des „Layover“ hineinspielen.

Die aus den Bild-Triplets des aufsteigenden bzw. des absteigenden Orbits hergeleiteten Oberflächenmodelle sind in Abbildung 7 dargestellt. Diese sind noch mit den durch die Punktelimination bedingten Lücken behaftet, welche relativ ausgedehnte Bereiche repräsentieren und dem oben Gesagten folgend vornehmlich an den west-exponierten Hängen im Falle des aufsteigenden und an den ost-exponierten Hängen im Falle des absteigenden Orbits auftreten. Mit dem in Abschnitt 5.4 skizzierten Ansatz wurden diese beiden Produkte fusioniert. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 (links) dargestellt und zeigt, dass die relativ großen Lücken der beiden Oberflächenmodelle durch Einfügen von Höheninformation des jeweils anderen Modells drastisch reduziert werden können. Eine Interpolation dieser Bereiche ist weitgehend unproblematisch und führt zu dem in Abbildung 8 (rechts) dargestellten Ergebnis.

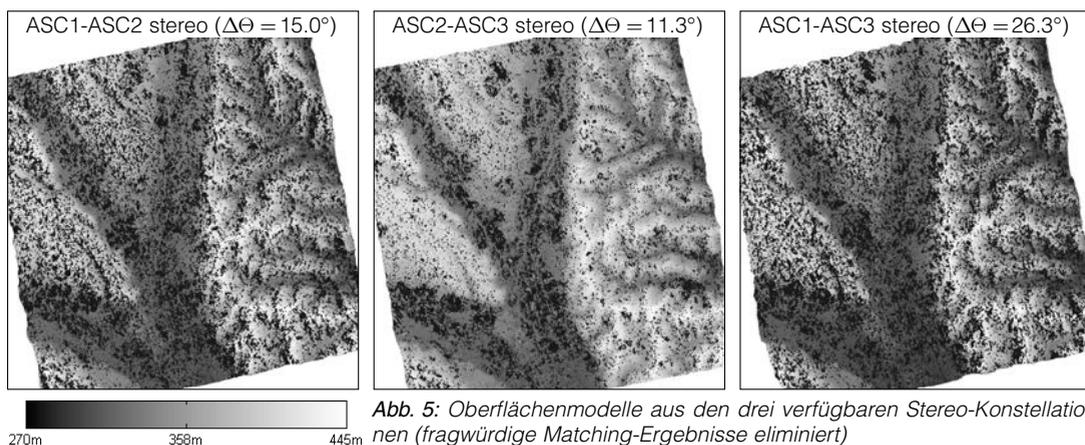


Abb. 5: Oberflächenmodelle aus den drei verfügbaren Stereo-Konstellationen (fragwürdige Matching-Ergebnisse eliminiert)

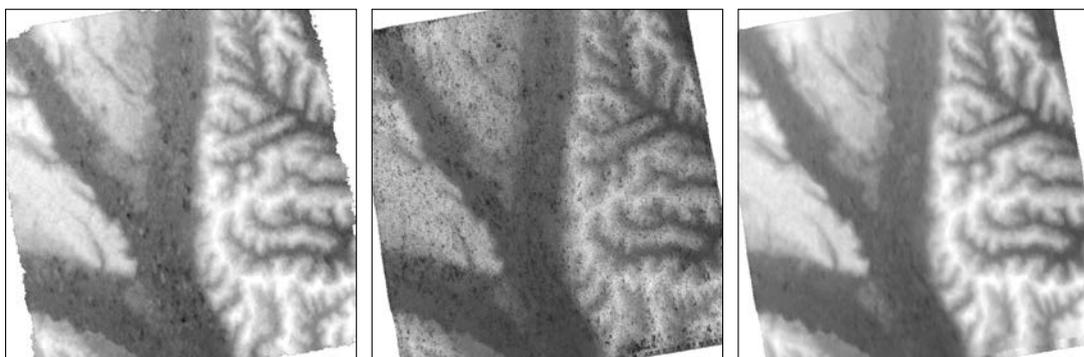


Abb. 6: Oberflächenmodelle aus Stereopaar „2-3“ (links) sowie aus Bild-Triplett (Mitte: Elimination fragwürdiger Matching-Ergebnisse; rechts: Interpolation dieser Bereiche)

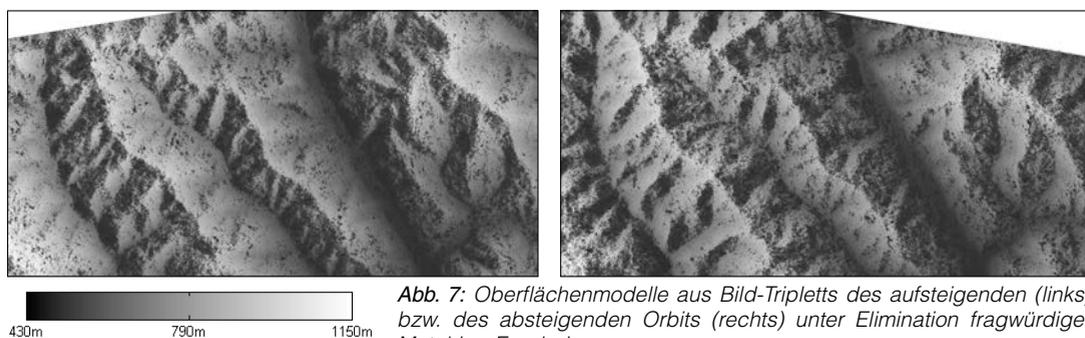


Abb. 7: Oberflächenmodelle aus Bild-Triplets des aufsteigenden (links) bzw. des absteigenden Orbits (rechts) unter Elimination fragwürdiger Matching-Ergebnisse

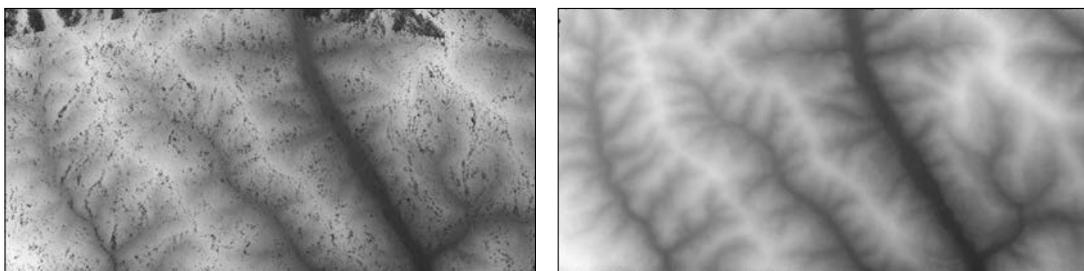


Abb. 8: Verschneidung der Oberflächenmodelle aus Bild-Triplets unter Elimination fragwürdiger Matching-Ergebnisse (links oben) bzw. nach Interpolation dieser Bereiche (rechts oben)

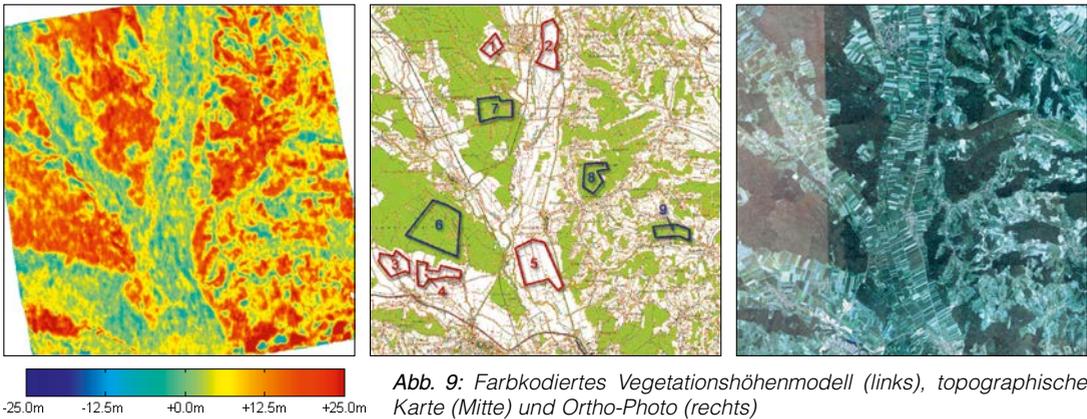


Abb. 9: Farbkodiertes Vegetationshöhenmodell (links), topographische Karte (Mitte) und Ortho-Photo (rechts)

7. Validierung

Die Validierung der erstellten Oberflächenmodelle gestaltet sich insofern problematisch, als die Testgebiete – insbesondere „Baernbach“ – mehrheitlich mit ausgedehnten Waldbeständen bedeckt sind. Geeignete Referenzdaten für das Baumkronen-Dach liegen derzeit noch nicht vor. In einem ersten Schritt wurde daher für das eher flache Testgebiet „Burgau“ ein Vergleich zum vorliegenden Höhenmodell durchgeführt.

Zunächst wurde ein „Vegetationshöhenmodell“ durch Differenzbildung zwischen TerraSAR-X Oberflächenmodell und Referenz-DHM generiert. Die farbkodierten Höhendifferenzen sind in Abbildung 9 (links) dargestellt, in welcher nun die warmen Farbtöne positive Höhenwerte zeigen und Vegetationsbestand signalisieren. Zum Vergleich ist in dieser Abbildung der entsprechende Ausschnitt der ÖK50 (Mitte) bzw. des Ortho-Photos (rechts) zu sehen, welche die Waldbestände unmittelbar ausweisen.

Grundsätzlich ist eine weitgehende Korrespondenz der Waldbestandsflächen zu erkennen. Die Waldränder zeigen mehrheitlich Rampen, was auf die Seitsichtgeometrie des TerraSAR-X zurückzuführen ist, welche in diesen Bereichen zu Layover oder Abschattung führt, und somit keine plausible Höhenrekonstruktion erlaubt. Einige Ausreißer in Form von Absenkungen von 10 Metern und mehr sind auch zu sehen, deren Ursache in lokalen Matching-Problemen liegt, welche im Zuge der Oberflächenmodell-Generierung nicht eliminiert werden konnten.

Für ausgewählte „Areas of Interest (AOI)“ (siehe Abbildung 9, Mitte) über Freiflächen wie auch über Waldbeständen wurden in weitere Folge statistische Kenngrößen wie Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Diese sind in der Tabelle 4 für 5 Freiflächen und 4 Waldbestände zusammengefasst.

Für die Freiflächen ergeben sich mit Ausnahme der AOI #3 Mittelwerte knapp über 0 Metern, was durch einzelne Vegetationsbestände bedingt durchaus plausibel erscheint. Die Standardabweichung liegt im Bereich von etwa 2.5 bis 3.5 Metern, und ist somit in der Größenordnung des 2- bis 2½-fachen RMS-Fehlers der Tabelle 2. Für die Waldbestände liegen die Mittelwerte der Vegetationshöhen im Bereich von 12 bis 20 Metern, was durchaus wieder den realen Baumhöhen entsprechen könnte.

Freiflächen			Waldbestände		
AOI	Mw	Std	AOI	Mw	Std
#1	0.57	3.63	#6	15.5	3.81
#2	0.33	2.57	#7	16.1	4.52
#3	-0.39	2.81	#8	20.0	3.50
#4	0.90	3.13	#9	12.3	4.20
#5	0.80	2.88			

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichung der Höhendifferenzen für ausgewählte AOIs

Für eine durchgreifende Analyse und Validierung der Oberflächenmodelle wären Referenzdaten mit entsprechend hoher Genauigkeit erforderlich. Insbesondere für die bewaldeten Flächen, wo zusätzlich die Eindringtiefe des SAR in das Baumkronen-Dach eine zu untersuchende Komponente darstellt, wären dies idealerweise Oberflächen- wie auch Bodenmodelle aus Laser-Scanner-Daten. Die Akquisition solcher Daten ist derzeit noch im Gang.

8. Zusammenfassung und Ausblick

In der gegenständlichen Studie wurde die 2D- wie auch die 3D-Geolokalisierungsgenauigkeit von TerraSAR-X Spotlight-Bildern analysiert. Grundlage hierfür waren Passpunkte in Form von natürlichen Objekten mit der ihnen eigenen Identifizier- und Messungengenauigkeit. Die seitens des DLR spezifizierten 2D-Genauigkeiten im Bereich eines

Meters konnten für die verwendeten Bilddaten nicht bestätigt werden. Zum Teil wurden initiale Lagefehler in der Größenordnung von bis zu 6 Pixel (RMS) erzielt, welche auf Grund ihrer Charakteristik durchaus nicht auf die Ungenauigkeit der verwendeten Kontrolldaten und Passpunktmesungen zurückzuführen sind. Ein Sensormodell-Ausgleich wurde daher durchgeführt, welcher auf die sogenannten Azimut- und Range-Konvertierungsparameter beschränkt werden konnte. Für MGD-Produkte ist selbst dies bedingt durch die für die „Slant-to-ground-range“-Konvertierung verwendeten Polynome 5. Ordnung eine sensible Konstellation, welche eine ausreichende Anzahl von gut verteilten Passpunkten erfordert.

Auf Basis der ausgeglichenen Sensormodelle wird eine durchaus vielversprechende 3D-Genauigkeit mit Lagefehlern von etwa 2 Metern signalisiert. Nichtsdestotrotz stellt die flächenhafte 3D-Rekonstruktion aus hochauflösenden TerraSAR-X-Daten eine große Herausforderung dar, da bei den verwendeten Daten das Bild-Matching durch den SAR-Speckle generell sowie die bewaldeten Flächen und zeitlich bedingten radiometrischen Bildunterschiede mit einem hohes Fehler-Potential behaftet ist. Anhand der aufgezeigten Anwendungsbeispiele konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung von Bild-Triplets und daraus resultierenden Mehrfach-Matching-Ergebnissen einerseits, sowie die Verwendung von Daten des aufsteigenden wie auch des absteigenden Orbits andererseits, optimale Rahmenbedingungen für die Oberflächenreduktion darstellen, unter welchen eine deutliche Reduktion der aus den fehlerhaften Matching-Ergebnissen resultierenden Artefakte möglich ist.

Eine detaillierte Validierung der für die ausgewählten Testgebiete generierten Oberflächenmodelle war bisher mangels entsprechender Referenzdaten, insbesondere für das Baumkronen-Dach, nicht möglich. Für ausgewählte Ausschnitte sind die über Freiflächen im Vergleich zum Referenz-Bodenmodell hergeleiteten Höhenunterschiede zufriedenstellend klein und korrespondieren gut mit der Genauigkeitsabschätzung über Passpunkte. Über bewaldeten Flächen bewegen sich Höhendifferenzen zum Bodenmodell, welche quasi die Baumhöhen repräsentieren, in einer durchaus plausiblen Größenordnung. Eine definitive Genauigkeitsaussage kann hier allerdings nur auf Basis eines genauen Referenz-Oberflächenmodells gemacht werden. Hierfür sollen in naher Zukunft aus Laser-Scanner-Daten hergeleitete Oberflächen- wie auch Bodenmodelle akquiriert werden.

Danksagung

Die präsentierten Forschungsarbeiten sind in zwei Projekten im Rahmen des Austrian Space Applications Programms (ASAP) unter Förderung der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) eingebettet. Die TerraSAR-X Daten wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bzw. von Infoterra-Deutschland zur Verfügung gestellt.

Literaturverzeichnis

- [1] DLR, 2008. TerraSAR Ground Segment – Basic Product Specification Document, Doc. TX-GS-DD-3302, issue 1.5, 103 Seiten.
- [2] Raggam H. und K.H. Gutjahr, 1998. Evaluation of Radarsat Stereo Data. Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, pp. 103-106.
- [3] Curlander J. C., 1982. Location of space-borne SAR imagery. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 20(3), pp. 359-364.
- [4] Schmidt N., J. Janoth, H. Raggam, K. Gutjahr und A. Wimmer, 2007. TerraSAR-X Value-Added Image Products. "IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium".
- [5] Fritz T., H. Breit, und M. Eineder, 2008. TerraSAR-X Products – Tips and Tricks. 3rd TerraSAR-X workshop, Oberpfaffenhofen. Published at <http://sss.terrasar-x.dlr.de/>
- [6] Raggam H., K.H. Gutjahr, R. Perko und M. Schardt, 2008. Assessment of the Potential of TerraSAR-X with Respect to Mapping Applications Using Radargrammetric and Interferometric Techniques. 3rd TerraSAR-X workshop, Oberpfaffenhofen. Published at <http://sss.terrasar-x.dlr.de/>
- [7] Leberl F. 1978. Satellitenradargrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Serie C, No. 239, ISBN 3769692942, 156 Seiten.
- [8] Paar G. und Pölzleitner W., 1992. Robust disparity estimation in terrain modelling for spacecraft navigation, ICPR.
- [9] Hirschmüller H. 2008. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information, PAMI, 30, pp. 328-341.
- [10] Raggam H., 2005. Surface Mapping using Image Triplets – Case Studies and Benefit Assessment in Comparison to Stereo Image Processing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(5), pp. 551-563.

Anschrift der Autoren

Dr. Hannes Raggam, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Wastiangasse 6, A-8010 Graz.

E-mail: hannes.raggam@joanneum.at

Dr. Roland Perko, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Wastiangasse 6, A-8010 Graz.

E-mail: roland.perko@joanneum.at

Dr. Karlheinz Gutjahr, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Wastiangasse 6, A-8010 Graz.

E-mail: karlheinz.gutjahr@joanneum.at

Vortragender

Dr. Hannes Raggam

1955 geboren

1980-1984 Freier Mitarbeiter am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research

Seit 1984 Angestellt am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research. Leiter der Arbeitsgruppe für „Geometrische Bildverarbeitung von Fernerkundungsdaten“ 