

Globale Kartierung und lokale Deformationsmessungen mit den Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X

Michael Eineder, Richard Bamler, Xiao Ying Cong, Stefan Gernhardt, Thomas Fritz, Xiao Xiang Zhu, Ulrich Balss, Helko Breit, Nico Adam und Dana Floricioiu

Zusammenfassung

Seit 2007 versorgt der deutsche Radarsatellit TerraSAR-X täglich Wissenschaftler und kommerzielle Kunden mit Radaraufnahmen der Erdoberfläche mit bis zu 1 m Auflösung. Durch diese enorme Verbesserung gegenüber früheren Satelliten mit 5 bis 20 m Pixelraster können heute nicht nur regionale Strukturen, sondern sogar einzelne Gebäude in ihren Details aufgelöst werden. Ende 2010 wurde TerraSAR-X durch den Schwestersatelliten TanDEM-X zu einer Radar-Interferometer-Formation ergänzt. Seitdem wird die gesamte Erde in bisher unerreichter Auflösung (12 m) und Höhengenaugigkeit (2 m, 90 %) topografisch vermessen. Erste Ergebnisse der zirka drei Jahre dauernden TanDEM-X-Mission bestätigen bereits die angestrebte Genauigkeit. Der Beitrag gibt einen Überblick über den Einsatz der Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X im Bereich der Vermessung und erläutert die aktuell erreichten Genauigkeiten.

Summary

The German Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite TerraSAR-X was launched into orbit in 2007. Since then it is delivering imagery of the Earth's surface with a resolution of up to 1 m to commercial and scientific users. Compared to the 5 to 20 m resolution of earlier SAR systems, this high resolution resolves not only regional structures but even details of single buildings. In 2010, TerraSAR-X was complemented by an almost identical sister-satellite to form a dual-satellite interferometric formation which is capable to generate digital elevation models. This interferometer – called the TanDEM-X mission – is since then used to map the whole Earth's topography with 12 m horizontal resolution and 2 m (90 %) height error, an accuracy unprecedented so far. The TanDEM-X mission will last for three years and the current results confirm the predicted accuracy. This paper discusses some aspects of both, the TerraSAR-X and the TanDEM-X missions related to surveying and geodesy and reports the accuracy achieved so far.

Schlüsselwörter: TerraSAR-X, TanDEM-X, Höhenmodell (DEM), SAR-Geolokation, SAR-Interferometrie

1 Einführung

Der deutsche TerraSAR-X Satellit wurde als Public-Private-Partnership zwischen dem DLR und der Firma Astrium realisiert und 2007 in einen polaren Orbit gebracht. Sein Hauptinstrument ist ein bildgebendes Mikrowellenradar



Abb. 1: Mertz-Gletscher in der Antarktis. Durch Kollision mit einem 97 km langen Eisberg (oben rechts) wurde die Gletscherzunge abgebrochen (oben links). TerraSAR-X 1.3.2010.

mit synthetischer Apertur (SAR), wie es seit 1991 auch auf den europäischen Satelliten ERS-1, ERS-2 und ENIV-SAT betrieben wurde. Im Unterschied zum C-Band-SAR (5,6 cm) dieser Satelliten sendet TerraSAR-X im X-Band, d.h. mit 3,1 cm Wellenlänge. Sowohl C-Band- als auch X-Band-Mikrowellen durchdringen selbst dichte Wolken nahezu ungestört. Radarbilder der Erdoberfläche können also unabhängig von Licht- und Wetterverhältnissen gewonnen werden und eignen sich daher insbesondere für die schnelle Kartierung von Naturkatastrophen, für die militärische Aufklärung und allgemein für die weltweite regelmäßige Beobachtung der Umwelt. Besonders tropische Gebiete oder Polargebiete können wegen der häufigen Wolkenbedeckung bzw. der langen Polarnacht besser mit SAR als mit optischen Systemen abgebildet werden (Abb. 1).

Durch Radarprinzip und Apertursynthese erreichen heutige SAR-Systeme wie TerraSAR-X (Buckreuss 2003,

Breit 2010) und CosmoSkymed Auflösungen von 1 m, können also in dieser Hinsicht durchaus mit optischen Systemen konkurrieren, beziehungsweise diese ergänzen. Lediglich das dem SAR inhärente Schrägsichtprinzip führt bei senkrechten Strukturen wie Gebäuden zu Überlagerungen (Abb. 2), die nur mit aufwändigen tomografischen Methoden aufgelöst werden können.



Abb. 2: TerraSAR-X Bild des DLR-Standortes Oberpfaffenhofen. Die Reflektionen senkrechter Fassaden sind dem Bodensignal überlagert.

Dieser Beitrag widmet sich insbesondere den geometrischen Möglichkeiten moderner SAR-Systeme, die sie von optischen Systemen unterscheiden. Hochgenaue Entfernungsmessung im Zentimeterbereich und interferometrische Auswertemethoden im Millimeterbereich sind aus dem Weltraum nur mit SAR möglich. Die beiden deutschen SAR-Systeme TerraSAR-X und TanDEM-X wurden konsequent in diese Richtung weiterentwickelt und sehr genau kalibriert. Sie können derzeit als Referenz hinsichtlich ihrer geometrischen Genauigkeit betrachtet werden. Besonders das TanDEM-X Interferometer nutzt eine ganze Reihe innovativer Methoden für die Erstellung eines globalen hochaufgelösten Höhenmodells der Erde.

Wir berichten zunächst über jüngste Fortschritte der Präzisionslokalisierung und deren Anwendung für Deformationsmessungen. Weiterhin zeigen wir aktuelle Ergebnisse der SAR-Interferometrie für Deformationsmessungen. Ein Kapitel ist der TanDEM-X-Mission mit ihren technischen Herausforderungen und ersten Ergebnissen gewidmet.

2 SAR-Lokalisierungsgenauigkeit

Bedingt durch das Messverfahren ist beim SAR die Abbildungsgeometrie sehr genau bekannt. Echo-Laufzeitmessungen können ohne weiteres mit einer Genauigkeit von 10^{-9} Sekunden durchgeführt werden, entsprechend einer Entfernung von nur 15 cm. Auch die Bahnkenntnis von Satelliten liegt bei wenigen cm Genauigkeit (Yoon 2008). Die Bahn wurde früher vom Boden aus durch Lasertracking bestimmt, während bei TerraSAR-X erstmals ein Zweifrequenz-GPS-Empfänger (IGOR) eingesetzt wurde um Zentimetergenauigkeit zu erreichen.

In dieser Größenordnung spielen allerdings auch andere Effekte eine Rolle, wie die Gruppenlaufzeitverzögerungen durch die Erdatmosphäre sowie die Dynamik der Koordinatensysteme. Gruppenlaufzeitverzögerungen durch die Atmosphäre werden durch trockene Gase, den Wasserdampf und die Dichte freier Elektronen bestimmt. Die scheinbare Wegverlängerung kann durch die Integration über die Refraktivität N entlang der Sichtlinie sehr gut modelliert werden (Hanssen 2001):

$$L = 10^{-6} \int_{r_{\text{ground}}}^{r_{\text{satellite}}} N \, dr$$

$$= 10^{-6} \int_{r_{\text{ground}}}^{r_{\text{satellite}}} \left(k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} + 1.45 W_{cl} + 4.028 \frac{n}{f^2} \right) dr, \quad (1)$$

wobei k_1 , k_2 und k_3 Konstanten sind und T die Temperatur, e den Partialdruck des Wasserdampfes, P_d den trockenen Anteils des atmosphärischen Drucks, W_{cl} die flüssige Wassersäule in der Atmosphäre, n die ionosphärische Elektronendichte und f die Frequenz des Radarsystems bezeichnen.

Die Verlängerung liegt je nach Terrainhöhe und Schrägsichtwinkel in der Größenordnung von 2,5 bis 4 m (Hanssen 2001). Wenn Elektronendichte, Druck, Temperatur und Wasserdampfgehalt bekannt sind, so lassen sich diese Verlängerungen bis auf ca. 1 cm bestimmen und in der SAR-Echolaufzeit berücksichtigen (Eineder 2011a, Cong 2012).

Im Unterschied zum Wasserdampf der Atmosphäre sind die Phasen-Laufzeitänderungen durch die schwankende Elektronendichte der Ionosphäre frequenzabhängig und variieren daher von einigen Zentimetern im X-Band bis hin zu mehreren Metern im L-Band.

Weitere scheinbare Messfehler werden durch nicht konsistente Koordinatensysteme der Satellitenbahnbestimmung einerseits (z.B. ITRF bei TerraSAR-X) und des lokalen Referenzsystems (z.B. ETRF) andererseits verursacht. Werden hier beispielsweise Erdzeiten nicht berücksichtigt, so können Fehler von ± 20 cm (Eineder 2011a) resultieren. Kontinentaldriften verursachen selbst in Mitteleuropa Fehler von 2,5 cm pro Jahr (Tuttas 2011, Schubert 2012). Für TerraSAR-X wurden erstmals alle diese Effekte systematisch korrigiert und so relative Wiederholgenauigkeiten in der Größenordnung von 13 mm demonstriert (Balss 2012).

Auch in Azimutrichtung ermöglicht das SAR-Prinzip eine genauere Pixellokalisierung als optische Systeme, denn die Blickrichtung des SAR-Systems wird nicht durch die Ausrichtung der physikalischen Antenne, sondern durch die Ausrichtung der synthetischen Apertur, also der Flugbahn, bestimmt. Da diese über lange Bögen und mit Hilfe von Gravitationsmodellen modelliert wird, ist ihr Winkel sehr genau bekannt und die Azimut-Pixelgenauigkeit liegt im Zentimeterbereich. In der Praxis wird bei SAR-Systemen die Azimutlokalisierungsgenauigkeit nicht durch die Bahnkenntnis, sondern durch die Synchronisationsgenauigkeit zwischen der Uhr des Radars und der des GPS-Empfängers begrenzt. Bei TerraSAR-X wurde daher eine spezielle Synchronisationsschaltung vorgesehen, die beide Uhren sekundlich mit einer Genauigkeit von $18,6\mu\text{s}$ vergleicht. Damit werden Azimutlokalisierungsgenauigkeiten von etwa $4,4\text{ cm}$ erreicht (Balss 2012).

Somit wird die vom TerraSAR-X-System verlangte Pixel-Lokalisierungsgenauigkeit in Range um fast zwei und in Azimut um mehr als eine Größenordnung übertroffen. Auch ist aus diesen Ergebnissen zu vermuten, dass die Bahngenauigkeit – die ja in die Abstandsmessung mit eingeht – um fast eine Größenordnung besser ist, als zu Anfang der Mission geschätzt (Yoon 2008).

Diese hohe Pixel-Lokalisierungsgenauigkeit in Range und Azimut kann genutzt werden, um geometrische Verschiebungen der Erdoberfläche direkt aus dem Welt-raum zu messen. Man nutzt dabei die Tatsache, dass zivile SAR-Satelliten üblicherweise in einer sonnensynchronen Bahn mit einem auf die Erde bezogenen Wiederholzyklus von W ganzzahligen Tagen betrieben werden, d. h. nach W Tagen wird das Gebiet mit nahezu identischer Beobachtungsgeometrie aufgenommen und es können kleinste Veränderungen detektiert werden. Bei TerraSAR-X ist $W = 11$ (ERS, ENVISAT: $W = 35$). Verändert sich dagegen die Beobachtungsgeometrie zwischen den Wiederhol-aufnahmen, so können durch die entstehende Parallaxe zeitliche Veränderungen nicht von der Topografie unterschieden werden – außer diese ist bereits bekannt. Dieser Effekt stört insbesondere bei der Radarinterferometrie (siehe unten). Daher wird bei TerraSAR-X durch die Vorgabe einer maximalen Bahnabweichung von 250 m diese Parallaxe minimiert.

3 Anwendungen der SAR-Pixellokalisierung

Die sehr genau bestimmbare Position eines Objektes im Radarkoordinatensystem kann für Vermessungsaufgaben genutzt werden, insbesondere für die Messung von Verschiebungen auf der Erdoberfläche. Voraussetzung für eine Vermessung bzw. Verschiebungsmessung auf Basis des Bildinhaltes ist, dass Objekte eindeutig im Bild identifiziert werden können und das Störsignal überlagern, wie das sehr helle Punktsignal eines Radarreflektors (Abb. 3), oder dass Objekte eine über den Wie-



Abb. 3: Radarreflektor am geodätischen Observatorium in Wettzell

derholzyklus räumlich stabile Signatur enthalten, deren Verschiebung zwischen zwei Bildern durch Korrelationsverfahren bestimmt werden kann. Die praktische Durchführung beider Varianten beinhaltet Interpolationen im Bild- bzw. Korrelationsraster von weniger als $1/100$ Pixel, erfordert also höchste Sorgfalt bei der Signalverarbeitung. Die maximal erzielbare Genauigkeit hängt von vielen Parametern wie der Wellenlänge, der Auflösung, der Stärke des Umgebungssignals und der zeitlichen Kohärenz ab und ist gut berechenbar (Bamler 2005). Bereits mit einer Kantenlänge eines Radarreflektors von 70 cm kann mit TerraSAR-X Millimetergenauigkeit erreicht werden. Beim Korrelationsverfahren werden für vergleichbare Genauigkeiten Flächen von zirka $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ und größer benötigt, je nach zeitlicher Stabilität der reflektierenden Erdoberfläche.

Abb. 4 zeigt die Abweichungen zwischen der prognostizierten Position des Wettzell-Reflektors im Radarbild und der tatsächlich im Bild gemessenen Position,

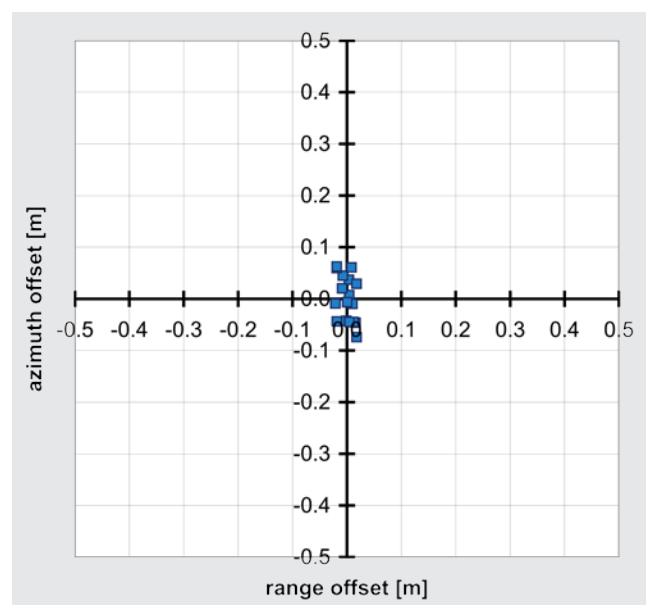


Abb. 4: Geometrische Streuung des Radarreflektors in Wettzell in 13 Radaraufnahmen. Der Fehler liegt bei 13 mm in Range und 44 mm in Azimut.

gemessen in der Range-Azimet-Geometrie des Radars, wobei jeder Messpunkt einer unabhängigen Radaraufnahme entspricht. Sie enthält also bereits sämtliche Fehlerquellen, von der Bahnbestimmung bis zur Interpolation im Bild.

Diese besonders hohe Lokalisationsgenauigkeit von TerraSAR-X ermöglicht nun Anwendungen, die bisher GPS-Stationen vorbehalten waren. So konnte zum Beispiel die Oberflächenverschiebung durch das Japan-Erdbeben im März 2011 (Abb. 5) bestimmt werden (Yague-Martinez 2012).

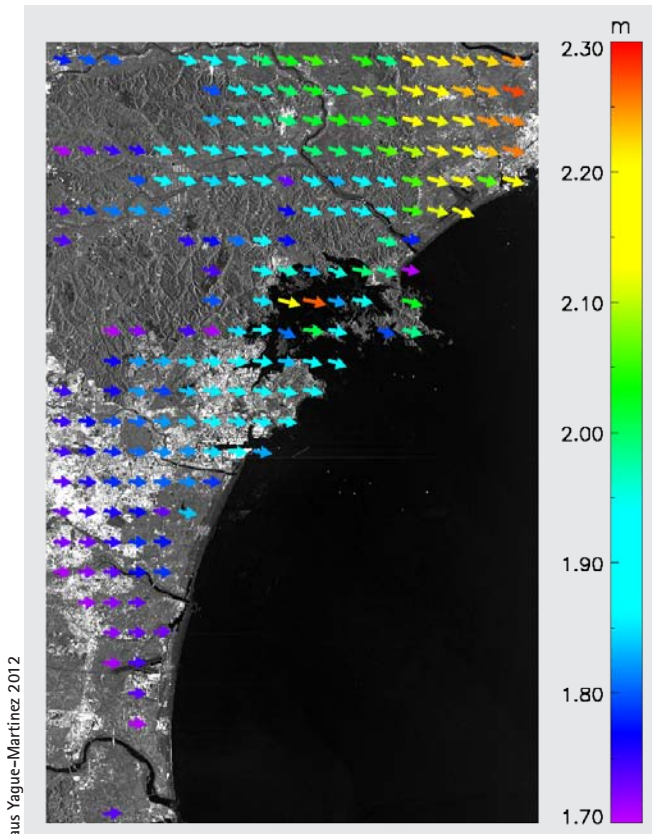


Abb. 5: Oberflächenverschiebungen des Tohoku-Oki-Erdbebens am 11.3.2011 gemessen mit TerraSAR-X Bildkorrelation.

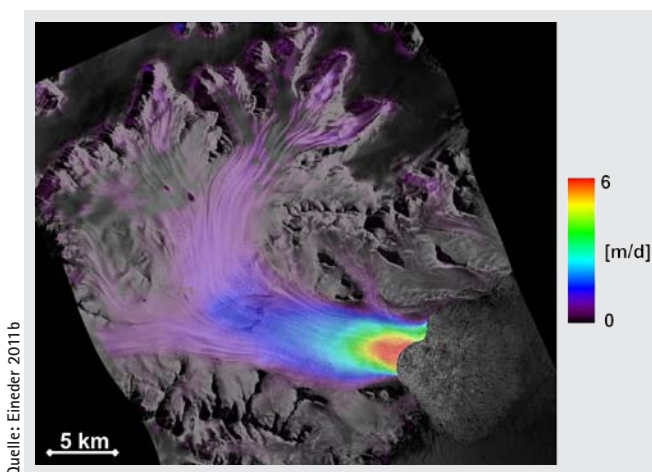


Abb. 6: Fließgeschwindigkeit des antarktischen Drygalski-Gletschers gemessen mit TerraSAR-X Bildkorrelation.

Weiterhin werden bereits bekannte Anwendungen sehr viel genauer und robuster, wie die Bestimmung von zweidimensionalen Gletscherfließgeschwindigkeitsfeldern, wie in Abb. 6 gezeigt (Rott 2008 und 2011). TerraSAR-X löst bisher nicht erkennbare Features wie Gletscherspalten auf und kann daher an Orten für die Geschwindigkeitsmessung eingesetzt werden, die in der Vergangenheit mit niedriger Auflösung nur als strukturlose Oberflächen erschienen. Abb. 6 zeigt eine derartige Messung am Drygalski-Gletscher in der Antarktis, einem nur sehr schwer zugänglichen Gebiet.

4 SAR-Interferometrie

Das kohärente Aufnahmeprinzip beim SAR ermöglicht nicht nur die Formung einer synthetischen Apertur. Auch nach der Fokussierung ist in jedem Bildpunkt neben der Intensität (Helligkeit) die Empfangsphase des Signals enthalten. Diese enthält neben zufälligen Streubeiträgen die Entfernungsinformation zwischen Antenne und Streuer, gemessen als Bruchteil einer Wellenlänge. Subtrahiert man die Phasen zweier SAR-Bilder, so werden im sogenannten Interferogramm für jeden einzelnen Bildpunkt die Entfernungsunterschiede im Millimeterbereich isoliert. Je nach Wellenlänge liegt die Genauigkeit daher im Millimeter- (X-Band) bis Zentimeterbereich (L-Band).

Je nachdem, ob die SAR-Bilder aus leicht unterschiedlichem Blickwinkel (Across-Track) oder zu verschiedenen Zeitpunkten (D-InSAR) aufgenommen wurden, können aus dem Interferogramm topographische Modelle oder Deformationskarten der Erdoberfläche abgeleitet werden. Abb. 7 zeigt ein Interferogramm der TanDEM-X-Mission.

Aufgrund der Größenverhältnisse von Abstand und Basislinie und eines typischen Phasenrauschens von z. B. 10° ergibt sich bei der Höhenbestimmung im X-Band ($\lambda = 3,1 \text{ cm}$) mit typischen Basislinien von $B = 100 \text{ m}$ und Abständen $R = 700 \text{ km}$ bei einem Einfallswinkel von $Q = 45^\circ$ ein Höhenfehlerrauschen von etwa 2 m :

$$\sigma_h = \frac{10^\circ \lambda R \sin \theta}{2 \cdot 360^\circ B} \quad (2)$$

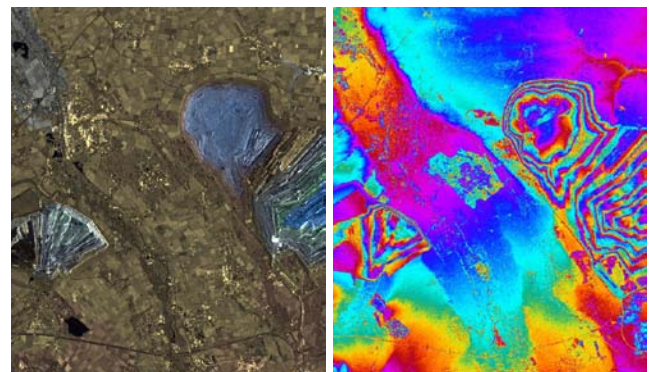


Abb. 7: TanDEM-X-Aufnahmen vom Tagebau Hambach 12.10.2011. Links: SAR-Bild (künstliche Färbung aus Geländehöhe). Rechts: Interferogramm

Formel (2) gilt für die Repeat-Pass-Interferometrie. Bei Single-Pass-Systemen wie SRTM und TanDEM-X halbiert sich die physikalische Basislinie.

Im Gegensatz dazu werden Deformationen direkt in der Entfernungsrichtung gemessen und die Genauigkeit hängt daher von der Wellenlänge ab und bis auf sekundäre SNR-Effekte nicht grundsätzlich vom Abstand:

$$\sigma_r = \frac{10^\circ \lambda}{2 \cdot 360^\circ} \quad (3)$$

Die Messgenauigkeit liegt im X-Band daher theoretisch (im Vakuum) im Millimeterbereich, wird allerdings in der Praxis durch die bereits zuvor beschriebenen wesentlich größeren Ausbreitungsstörungen dominiert.

Eine weitere Einschränkung der SAR-Interferometrie ist die sogenannte Phasendekorrelation. Sie wird durch Änderung der Streueranordnung innerhalb einer Auflösungszelle zwischen den Aufnahmen verursacht. In der Praxis treten großflächige Dekorrelationen bei Vegetation durch Wachstum oder Bewegung im Wind, bei Eisoberflächen durch Schneefall und Schneeschmelze und bei Gewässern durch die schnelle Änderung der Form der Kapillarwellen der Oberfläche auf. Man spricht dann von zeitlicher Dekorrelation.

Da bereits Änderungen im Sub-Wellenlängenbereich relevant sind, tritt zeitliche Phasendekorrelation eher bei kurzen X-Band-Wellenlängen (3,1 cm) als im L-Band (24 cm) auf. Agrarflächen sowie mit Vegetation, Schnee und Eis bedeckte Landoberflächen sind im X-Band besonders kritisch, da diese Wellenlänge auch stark von der veränderlichen Objektoberfläche gestreut wird, während das L-Band diese Schichten durchdringt und eher vom stabileren, darunterliegenden Gelände reflektiert wird.

Eine seit Jahren praktizierte Methode zur Reduktion der atmosphärischen Störungen ist die Persistent-Scatterer-Interferometrie PSI (Ferretti 2001), bei der viele ($n > 20$), über lange Zeiträume gewonnene SAR-Aufnahmen analysiert werden. Durch Annahme eines einfachen, z.B. linearen Bewegungsmodells kann dann der atmosphärische Fehler um den Faktor $\sqrt{n}$ reduziert und eine Messgenauigkeit von mm/Jahr erreicht werden. Durch gleichzeitige Ausnutzung der Basislinienstreuung, die sich aus der unvermeidlichen Bahnvariation ergibt, kann gleichzeitig die Höhe des Punktes sehr genau (< 1 m) bestimmt werden.

Anwendung findet die PSI-Methode in stark unterschiedlichen Maßstäben. Während hochauflösende Analysen mit TerraSAR-X auf typisch $5 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ großen städtischen Szenen erfolgen, können ganze Länder mit global und kontinuierlich abbildenden Radarsensoren (ERS, Envisat/ASAR und in Zukunft Sentinel-1) auf Bodenbewegungen hin analysiert werden. Abb. 8 zeigt ein solches Wide-Area-Product (WAP), das im Auftrag der ESA erstellt wurde (Adam 2011a und 2011b). Bereits ein einfaches linear angenommenes Bewegungsmodell zeigt besonders in landwirtschaftlich intensiv genutzten Flä-

chen Absenkungen durch Grundwasserentzug, aber auch Verschiebungen durch tektonische Prozesse und durch Erdbeben. Da die Relativgenauigkeit des Verfahrens mit dem Abstand zum Referenzpunkt abnimmt, erfordert die großflächige Kartierung spezielle Mosaikierungstechniken und die Einbindung lokaler Referenzen, z.B. GPS-Stationen für eine absolute Kalibrierung.

Besonders interessant sind aber auch kleinräumige Untersuchungen bis hin zu einzelnen Gebäuden, wie sie unter Ausnutzung der höchsten Auflösung (ca. 1 m) von TerraSAR-X im High Resolution Spotlight Mode möglich

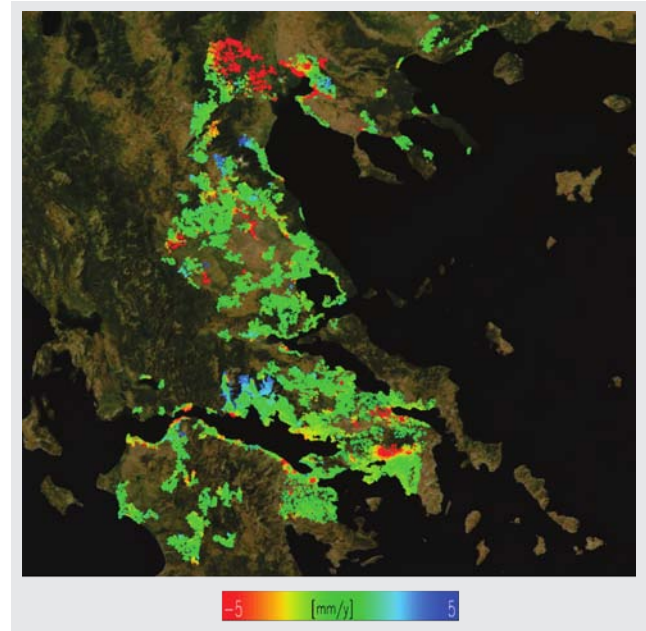


Abb. 8: Großflächige Persistent-Scatterer-Analyse über Griechenland. Die farbigen Bereiche zeigen durch Grundwasserentzug, Erdbeben und Tektonik verursachte Oberflächenbewegungen.

werden. In verschiedenen Veröffentlichungen (u. a. Gernhardt 2012) wurden bereits thermische Ausdehnungen von Stahlstrukturen nachgewiesen. In der Regel werden hier jahreszeitlich periodische Deformationsmodelle eingesetzt. Es können aber durch kombiniert linear/periodische Bewegungsmodelle jahreszeitliche Schwankungen von mehrjährigen Trends getrennt werden. Eine Kombination von Ergebnissen unterschiedlicher Aufnahmerichtungen (v. a. von auf- und absteigenden Bahnen) ermöglicht zudem die Trennung der Bewegungskomponenten in horizontaler und vertikaler Richtung. Abb. 9 zeigt Details der thermischen, saisonalen Deformation am Berliner Hauptbahnhof in Richtung West-Ost, sowie in der Vertikalen.

Allerdings bringt die PSI-Methode der zeitlichen Mittelung zur Genauigkeitssteigerung den Nachteil mit sich, dass sehr viele Datensätze erforderlich sind, deren Akquisition sich oft über Jahre erstreckt. Das macht die Methode teuer und langwierig. Bei sehr langen Zeiträumen tritt zudem das Problem der Phasendekorrelation besonders in den Vordergrund. Daher ist die PSI-Methode in der

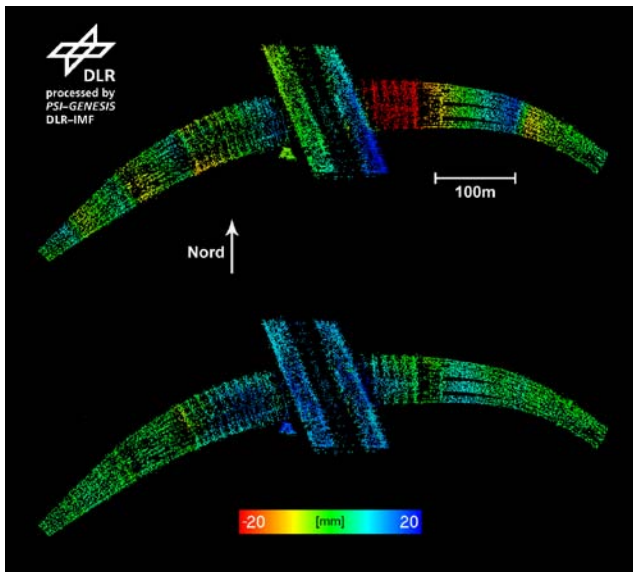


Abb. 9: Persistent-Scatterer-Analyse des Berliner Hauptbahnhofs. Die Farben bezeichnen die Größe der thermisch bedingten periodischen Deformationen in horizontaler West-Ost-Richtung (oben) und in der Höhe (unten) zwischen Winter und Sommer. Eine Phasenumkehr der Horizontalbewegung des Gleiskörpers markiert den Ort einer Schienenauszugsvorrichtung.

Regel auf Städte oder andere langzeitstabile Gebiete wie Steinwüsten beschränkt.

Wäre der Zustand der Atmosphäre zu den Aufnahmezeitpunkten bekannt, so könnten die Laufzeitverzögerungen berechnet und im Interferogramm kompensiert werden. Damit würde sich zumindest die Zahl der benötigten Szenen reduzieren. Seit einigen Jahren wird daher untersucht, ob hochauflösende Wettermodelle die dreidimensionale Verteilung von Druck, Temperatur und Wasserdampf hinreichend genau darstellen können, um die Wegverlängerung auf Millimeter genau zu modellieren. Die Schwierigkeit ist hier im Vergleich zu Wettervorhersagen etwas geringer, da für die Korrektur nur nachträgliche Analysen benötigt werden. Andererseits wird für die bildhafte Korrektur eines Interferogramms ein hochauflösender (ca. 100–500 m), räumlich und zeitlich exakt modellierter Zustand inklusive der atmosphärischen Turbulenzen benötigt. Leider weisen die bisherigen Ergebnisse von Wettermodellen nur in seltenen Fällen eine ausreichende Auflösung und raumzeitliche Genauigkeit auf (Rommen 2009, Perissin 2011). Die Ursache ist weit-

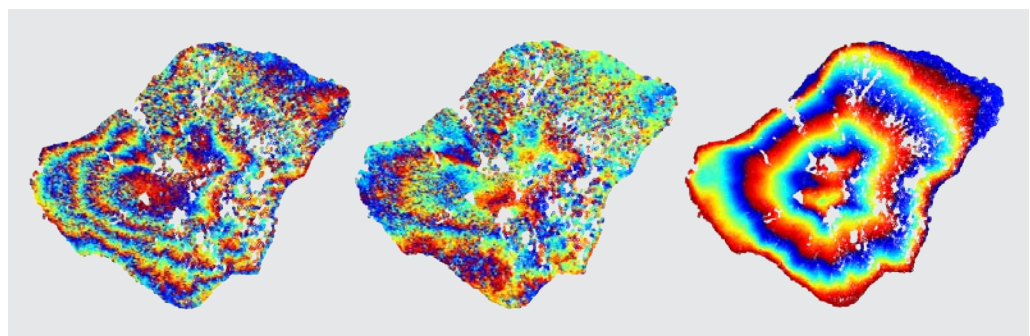
gehend in dem nicht hinreichend genau bekannten Ausgangszustand zu suchen sowie in den Randbedingungen der Atmosphäre zu Beginn des Modelllaufes.

Allerdings zeigt die Entwicklung der letzten Jahre (M. Zhu 2007, Rommen 2009, Cong 2012a, b, c), dass die Auswirkungen von großräumigen zeitlichen Variationen des Atmosphärenzustandes in bergigem bzw. vulkanischem Gelände mit vergleichsweise einfachen Methoden erheblich reduziert werden können. Das liegt daran, dass selbst lateral homogene Schichten große systematische, d.h. höhenabhängige Fehler verursachen, wenn zu den beiden Aufnahmezeitpunkten unterschiedliche Wetterbedingungen herrschten. Liegt ein grobes Geländemodell vor, so kann ein fertig abrufbares ECMWF Produkt (Cong 2012a) mit ca. 79 km Auflösung und 60 Druckschichtungen herangezogen werden, um systematische Laufzeitfehler von über 10 cm auf wenige Millimeter zu reduzieren. Abb. 10 zeigt links ein differenzielles Interferogramm des Vulkans Stromboli, das noch erhebliche, mit der Topografie gekoppelte Störsignaturen zeigt, obwohl die geometrischen Topografieeffekte zuvor herausgerechnet wurden. Die Erkennung von kleinen Oberflächenbewegungen ist aufgrund der starken Störungen nahezu unmöglich. Nach der Atmosphärenkorrektur nach (Cong 2012a) sind diese Störungen erheblich reduziert (Mitte).

Es kann an dieser Stelle zusammengefasst werden, dass SAR-Missionen in der Vergangenheit in vielen Fällen erfolgreiche Erddeformationsmessungen durch interferometrische Methoden ermöglichten, deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit allerdings erheblich durch Phasendekorrelation und Refraktion begrenzt wurden. Erst durch maßgeschneiderte Auswertalgorithmen und angepasste Bewegungsmodelle können die Deformationsparameter genauer bestimmt werden. Mit zunehmender Auflösung der SAR-Systeme und Steigerung der Genauigkeit, z.B. durch Atmosphärenkorrektur, werden die Messverfahren genauer und robuster und nähern sich der Genauigkeit von bodengebundenen GPS-Stationen an.

Zukünftige SAR-Missionen mit dem Ziel einer zuverlässigen globalen Erddeformationsmessung sollten daher erstens im L-Band betrieben werden, zweitens die Erde möglichst häufig abbilden um die atmosphärischen Störungen zu egalisieren und drittens Wettermodelle zur weiteren Reduktion einsetzen. Entsprechende Missionsvorschläge wurden unter den Akronym DESDynI von der NASA (Rosen 2011) und als Tandem-L-Mission vom

Abb. 10: Atmosphärische Korrektur durch ECMWF Wettermodell am Beispiel Stromboli. Links: unkorrigiertes differenzielles Interferogramm. Mitte: korrigiertes Interferogramm. Rechts: Atmosphärenkorrektur



Quelle: Cong 2012a

DLR (Krieger 2010) ausgearbeitet. Beide Missionen sind allerdings noch nicht entschieden. Einzig die europäische Sentinel-1-Mission wird derzeit implementiert (Attema 2010). Sie versorgt allerdings unterschiedliche GMES-Dienste und ist nicht streng auf hochgenaue Vermessungsaufgaben ausgelegt.

5 Die TanDEM-X-Mission

Zur Erstellung von Geländemodellen aus der SAR-Interferometrie ist eine örtliche Basislinie zwischen beiden Aufnahmen erforderlich, eine zeitliche Trennung der Aufnahmen ist dagegen in der Regel sehr nachteilig. Denn nur wenn die Aufnahmen gleichzeitig gemacht werden, entfällt der Effekt der zeitlichen Dekorrelation und auch der in beiden Aufnahmen identische Atmosphärenzustand kürzt sich im Interferogramm heraus.

Aus diesem Grund wurde im Jahr 2010 der zu TerraSAR-X nahezu baugleiche Satellit TanDEM-X in eine Umlaufbahn in unmittelbarer Nähe gebracht, um während einer mindestens dreijährigen Mission die gesamte Erde in einem Raster von 12 m topografisch zu kartieren. Es handelt sich hier um eine völlig neuartige Konstellation, denn sowohl der Formationsflug als auch der gleichzeitige Betrieb von unabhängig kommandierten und nicht synchronisierten Radarsystemen in unmittelbarer Nähe stellen schwierige Herausforderungen dar.

Tab. 1: TanDEM-X Produktspezifikation

Horizontales Raster	12 m (0,4" am Äquator)
Absolute horizontale Genauigkeit (90 %)	< 10 m
Absolute vertikale Genauigkeit (90 %)	< 10 m
Relative vertikale Genauigkeit (90 % Punkt zu Punkt innerhalb 1° × 1°)	< 2 m (≤ 20 % Steigung) < 4 m (> 20 % Steigung)

Innerhalb von ca. drei Jahren soll durch die TanDEM-X-Mission ein weltweites Höhenmodell gemäß der Spezifikation in Tab. 1 aufgenommen und berechnet werden. Daneben können Zwischenversionen und bei geeigneter Wahl der Basislinien lokale Versionen mit höherer Genauigkeit erzeugt werden.

6 Technologische Herausforderungen

Die Satellitenbahnen für SAR-Interferometrie sollen idealerweise parallel verlaufen und eine einstellbare Basislinie bieten, was aus bahnmekanischen Gründen unmöglich ist. Weiterhin dürfen sich die Bahnen nicht kreuzen oder auf andere Weise so nahe kommen, dass ein kurzzeitig außer Kontrolle geratener Satellit seinen Partner beschä-

digen könnte. Als Lösung wurde eine sogenannte Helix-Bahn gewählt (Moreira 2004), die zweimal während eines Erdumlaufs ideale Basislinienbedingungen bietet, während die effektive Basislinie an anderen Punkten zu Null wird. Durch leichte Variation der Bahnparameter kann der Bereich der maximalen effektiven Basislinie über die Breitengrade verschoben werden und so im Laufe eines Jahres die gesamte Erde einmal unter optimalen Bedingungen abgebildet werden.

Ein schwieriges Problem stellt die Synchronisation, genauer die Referenzierung der interferometrischen Phase auf Bruchteile einer Wellenlänge dar. Da das vom passiven Satelliten empfangene Echo mit einem anderen Oszillator demoduliert wird als es ausgesendet wurde, enthält es sämtliche Phasen- und Frequenzfehler beider Oszillatoren (Eineder 2003). Als Lösung wurde für TanDEM-X eine gepulste direkte Synchronisationsverbindung zwischen beiden Satelliten implementiert. Durch Einbezug dieser Signale in die interferometrische Auswertung am Boden können differenzielle Frequenz- und Phasenfehler zwischen beiden Oszillatoren kompensiert werden (Breit 2011).

7 Genauigkeit

Die relative Höhengenaugkeit zwischen zwei Pixeln der TanDEM-X-Daten wird wie zuvor in Formel (2) beschrieben im Wesentlichen von der Basislinie und vom Phasenrauschen bestimmt. Das Phasenrauschen wiederum hängt von der Sendeleistung, den Sende- und Empfangsantennendiagrammen sowie dem Abstand und den Reflektionsbedingungen ab. Aus diesem Grund sind radarinterferometrische Höhenmodelle in der Mitte des Aufnahmestreifens wegen der stärkeren Antennenausleuchtung genauer als am Rand und auf gut reflektierenden Oberflächen genauer als auf absorbierenden, wie zum Beispiel Sand.

Die frei wählbare Basislinie der TanDEM-X-Formation wurde so eingestellt, dass für den allergrößten Teil der Erdoberfläche die Fehler unterhalb von 2 m liegen. Durch Verschiebung der Aufnahmestreifen aufeinanderfolgender Jahre um eine halbe Streifenbreite wird bei der finalen Überlagerung der Höhenmodelle der Gesamtfehler reduziert und eine gleichmäßige Produktqualität erzielt. Auch aus einem weiteren wichtigen Grund sind mehrere Aufnahmen vom gleichen Gebiet nötig. Denn ähnlich wie bei GPS wird bei TanDEM-X die Entfernungsdifferenz zwischen beiden Antennen nur mehrdeutig mit der Wellenlänge im Intervall $[-\lambda/2, \lambda/2]$ gemessen. Die Rekonstruktion absoluter Höhen erfordert daher zuvor ein Unwrapping (Abwickeln) dieser mehrdeutigen Messung. In der Praxis werden unter Annahme von Glattheit bzw. Stetigkeit zwischen benachbarten Rasterpunkten Gradienten im Interferogramm geschätzt und diese aufintegriert. Radarschatten, Rauschen bei schlechtem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und steile Topografie erzeugen

allerdings Gradientenstörungen, die zu massiven Integrationsfehlern von einem oder mehreren Wellenzyklen führen können. Diese skalieren sich in das Geländemodell mit der Höhenmehrdeutigkeitskonstante

$$h_{2\pi} = \frac{\lambda R \sin \theta}{B} \quad (4)$$

Sie liegt in der Größenordnung von mehreren zehn Metern. Daher sind Phase-Unwrapping-Fehler normalerweise inakzeptabel. Allerdings gelingt die Auflösung der Mehrdeutigkeit zuverlässiger, wenn mehrere Aufnahmen mit unterschiedlicher Höhenmehrdeutigkeitskonstante gemeinsam verarbeitet werden (Eineder 2005, Lachaise 2012). Daher werden bei TanDEM-X in aufeinanderfolgenden Jahren die Aufnahmen mit leicht unterschiedlichen Basislinien durchgeführt und die Daten gemeinsam verarbeitet. Ohne diese Dual-Baseline-Verarbeitung gelingt das Phase-Unwrapping nur in Gebieten mit moderater Topografie zuverlässig.

8 Globales Mosaik

Aufgrund der schmalen Schwadbreite von 30 km und der begrenzten Einschaltlänge von ca. 1.000 km müssen für eine globale Abdeckung der Erdoberfläche tausende von Einzelaufnahmen gemacht, zu Höhenmodellen verarbeitet und dann kalibriert und mosaikiert werden. Abb. 11 zeigt die Erdabdeckung während des ersten Aufnahmejahres 2011.

Bei der Kalibrierung werden systematische Fehler der Basislinien und Phasenmessung, z.B. durch thermische Driften der Elektronik, kompensiert. Als Referenz werden GPS-Tracks und bevorzugt Laser-Altimeterdaten von Icesat (Gruber 2012) zugrunde gelegt. Dabei zeigte sich, dass durch die hervorragende Kalibrierung des TanDEM-X-Systems bereits absolute Höhengenaugkeiten im Meterbereich, also besser als die in der Spezifikation geforderten 10 m, erreicht werden und als Korrekturen in der Regel nur noch ein Angleich benachbarter Aufnahmestreifen notwendig ist. Erste Erfahrungen mit mosaikierten Produkten bestätigen auch die vorhergesagte relative Höhengenaugkeit von 2 m Punkt zu Punkt Fehler mit 90% Konfidenz.



Abb. 11:
Entwicklung der ersten Abdeckung von TanDEM-X im ersten Aufnahmejahr. Links: 1/2011, Mitte: 8/2011, Rechts: 3/2012. Grün: abgedeckte Gebiete

9 Besonderheiten

Die Reduktion des relativen Fehlers durch zeitliche Mittelung gelingt offensichtlich nur, wenn die Erdoberfläche keinen zeitlichen Änderungen unterworfen ist. Dies ist nicht immer der Fall. So wurden Änderungen in Waldgebieten durch Abholzung, in Gletschergebieten durch mehrjährige Schmelze (Abdel Jaber 2012), in städti-

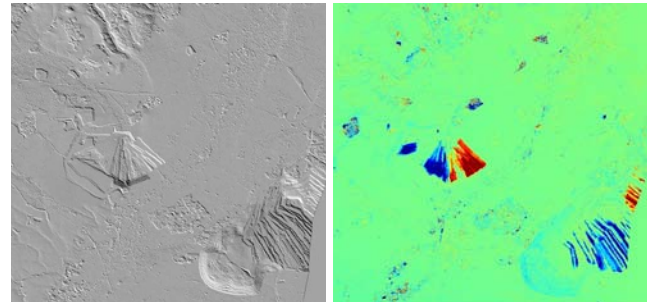


Abb. 12: Links: schattiertes TanDEM-X DEM vom Tagebau Hambach 2.12.2010. Rechts: Differenzielles TanDEM-X DEM 12.10.2011 – 2.12.2010, Farbskala: ± 32 m

schen Gebieten durch Neubau oder Abriss und besonders auch im Tagebau gefunden. Solange diese Änderungen nur einen Bruchteil der Höhenmehrdeutigkeitskonstante ausmachen, stören sie kaum bei der Verarbeitung. Das endgültige Höhenmodell wird dann den gewichteten Mittelwert der zu unterschiedlichen Zeiten gewonnenen Aufnahmen enthalten.

Größere Höhenänderungen, wie sie z.B. im Tagebau auftreten, können allerdings das Dual-Baseline-Unwrapping-Verfahren dermaßen stören, dass eine manuelle Nachverarbeitung erforderlich wird. Abb. 12 zeigt beispielsweise Höhenänderungen von über 30 m im Tagebau Hambach.

Aus den bisher gewonnenen Ergebnissen kann erwartet werden, dass die globale hochauflösende topografische Kartierung der Erde mit TanDEM-X gelingen wird und die Spezifikation übertroffen wird.

10 Ausblick

Die Genauigkeit des TanDEM-X-Höhenmodells ist in weiten Bereichen durch die Basislinie von ca. 200 bis 300 m bestimmt und die Rasterweite durch den SAR-Betriebs-

modus und die Bandbreite von derzeit 100 MHz. Beide Parameter wurden für eine globale Abdeckung optimiert, können jedoch mit dem existierenden System so variiert werden, dass auf kleineren Gebieten Höhenmodelle der nächsthöheren Qualitätsklasse erstellt werden können. So kann die Basislinie für flache Gebiete bis in den Kilometerbereich vergrößert werden, was den relativen Fehler bis in den Zentimeterbereich reduziert. Der Einsatz des Spotlight-SAR-Modus bei gleichzeitiger Vergrößerung der Bandbreite auf 300 MHz ermöglicht die Reduktion der Rasterweiten auf 2 bis 3 m, allerdings sinkt dann die Szenengröße auf etwa 5 km.

Ein weiteres Verfahren zur Reduktion der Rasterweite bei gleichzeitiger Erhaltung der Detailtreue ist die Verwendung von adaptiven Filtern, z.B. Non-Local-Means (NLM) (Deledalle 2011). Abb. 13 zeigt ein Beispiel, wie ein NLM-Filter das interferometrische Phasenrauschen reduziert und trotzdem feine Strukturen besser erhält als ein quadratisches Schätzfenster ähnlicher Größe. Auch die Kohärenzkarte, ein Maß für die lokale Phasenqualität, zeigt schärfere Strukturen.

Nicht verbessert werden durch obige Verfahren die SAR-spezifischen, durch die Schrägsicht bedingten Probleme. Bei steiler Topografie und speziell bei senkrechten Strukturen wie Gebäuden treten Abschattungen und Überlagerungen auf. Daher versagen dort alle konventionellen Unwrapping-Verfahren.

Einen Ausweg weisen tomografische Verfahren (X. Zhu 2010, 2011 und 2012), die aus mehreren Satellitenüberflügen ähnlich wie bei der PSI eine Apertur in Elevationsrichtung synthetisieren und damit gleichzeitig Überlagerungen auflösen und das Phase Unwrapping überflüssig machen. Abb. 14 zeigt eine derartige Auswertung. Diese Verfahren sind allerdings sehr aufwändig, sowohl was den Datenbedarf als auch die Komplexität der Verarbeitung betrifft.

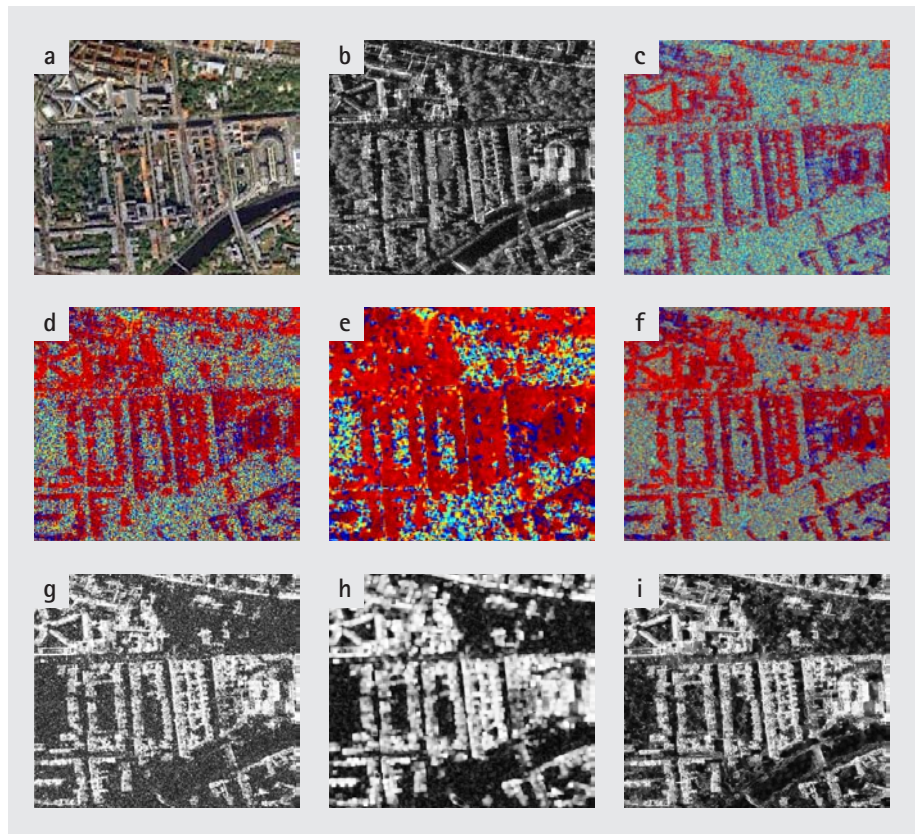


Abb. 13: (a) Optisches Bild des Gebietes, (b) SAR Amplitude, (c) interferometrische Phase, (d) durch einfache 5×5 -Mittelung gefilterte Phase, (e) 15×15 -Mittelung, (f) NLM-Filter, (g) Kohärenz mit 5×5 -Schätzfenster, (h) Kohärenz mit 15×15 -Schätzfenster, (i) Kohärenz mit NLM-Filter

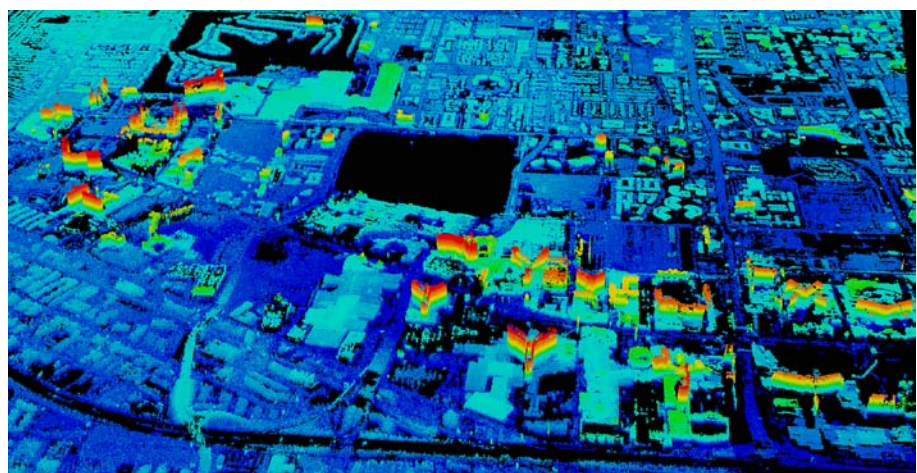


Abb. 14: Tomografische Auswertung eines SAR-Datenstapels von Las Vegas. Die perspektivische Ansicht zeigt Hochhäuser im Stadtzentrum, wobei die Farbe die rekonstruierte Höhe kennzeichnet. Gerechnet aus 30 TerraSAR-X High-Resolution-Spotlight Bildern.

Es darf aber damit gerechnet werden, dass beide Argumente mit zunehmender Zahl von verfügbaren Sensoren (z.B. vier CosmoSkymed-Satelliten) und steigender Rechenleistung (z.B. GPU und Cloud-Computing) mit der Zeit entkräftet werden. Weiterhin müssen derart aufwändige Verfahren nicht global eingesetzt werden, sondern können auf lokale Fälle mit komplexer Topografie beschränkt werden.

Literatur

- Abdel Jaber W., Floricioiu D., Rott H., Eineder M.: Dynamics of Fast Glaciers in the Patagonian Icefields Derived from TerraSAR-X and TanDEM-X Data, IGARSS 2012, Munich, 2012.
- Adam N., Rodriguez Gonzalez F., Parizzi A., Liebhart W.: Wide Area Persistent Scatterer Interferometry, Proc. of IGARSS 2011, Vancouver, Canada, July 2011.
- Adam N., Rodriguez Gonzalez F., Parizzi A., Liebhart W.: Wide Area Persistent Scatterer Interferometry: Algorithms and Examples, Proc. of FRINGE 2011, Frascati, Italy, September 2011.
- Attema E., Snoeijs P., Torres R., Pietropaolo A., Scaranari D., Mastroddi V., Occhigrossi S., Bruno C., L'Abbate M.: Analysis of Sentinel-1 Mission Capabilities, VDE EUSAR Conference, 2010.
- Balss U., Cong X.Y., Brcic R., Rexer M., Minet C., Breit H., Eineder M., Fritz T.: High Precision Measurement on the Absolute Localization Measurement of TerraSAR-X, IEEE IGARSS, Munich 2012.
- Bamler R., Eineder M.: Accuracy of Differential Shift Estimation by Correlation and Split Bandwidth Interferometry for Wideband and Delta-k SAR Systems, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 2 (Issue 2), pp. 151–155, 2005.
- Breit H., Fritz T., Balss U., Lachaise M., Niedermeier A., Vonavka M.: TerraSAR-X SAR Processing and Products, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 2, pp. 727–740, 2010.
- Breit H., Younis M., Balss U., Krieger G., Niedermeier A., Grigorov C., Hueso-Gonzalez J., Krieger G., Eineder M., Fritz T.: Bistatic Synchronization and Processing of TanDEM-X Data, IEEE IGARSS 2011, Vancouver, 2011.
- Buckreuss S., Balzer W., Mühlbauer P., Werninghaus R., Pitz W.: The TerraSAR-X Satellite Project, IEEE IGARSS, Toulouse, 2003.
- Cong X.Y., Eineder M.: Volcano Deformation Measurement Using Persistent Scatterer Interferometry With Atmospheric Delay Corrections, EUSAR 2012, Nürnberg, 2012.
- Cong X.Y., Eineder M., Fritz T.: Volcanic Deformation Monitoring Using TanDEM-X Acquisitions – Study Case: El Hierro (2011–2012), IEEE IGARSS 2012, Munich, 2012.
- Cong X.Y., Balss U., Eineder M., Fritz T.: Imaging Geodesy-Centimeter-Level Ranging Accuracy With TerraSAR-X: An Update, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, pp. 948–952, Vol. 9, Iss. 5, DOI: 10.1109/LGRS.2012.2187042, 2012.
- Deledalle C., Denis L., Tupin F.: NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49 (4), pp. 1441–1452, 2011.
- Eineder M.: Oscillator Clock Drift Compensation in Bistatic Interferometric SAR, IEEE IGARSS conference, Toulouse, 2003.
- Eineder M., Adam N.: A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, Iss. 1, pp. 24–36, 2005.
- Eineder M., Minet C., Steigenberger P., Cong X.Y., Fritz T.: Imaging Geodesy – Toward Centimeter-level Ranging Accuracy with TerraSAR-X, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 2, pp. 661–671, Feb. 2011.
- Eineder M., Jaber W.A., Floricioiu D., Rott H., Yague-Martinez N.: Glacier Flow and Topography Measurements with TerraSAR-X and TanDEM-X, IEEE IGARSS Vancouver 2011, pp. 3835–3838, 2011.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.: Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 8–20, 2001.
- Gernhardt S.: High Precision 3D Localization and Motion Analysis of Persistent Scatterers using Meter-Resolution Radar Satellite Data, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 672, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN 978-3-7696-5084-6, 130 S., 2012.
- Gruber A., Wessel B., Huber M., Roth A.: Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Theme issue »Innovative applications of SAR interferometry from modern satellite sensors«, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.06.002>, 2012.
- Hanssen R.F.: Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, 308 pp, Springer, New York, 2001.
- Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K., Eineder M., Younis M., De Zan F., Huber S., Lopez-Dekker P., Prats P., Werner M., Shen Y., Freeman A., Rosen P., Hensley S., Johnson W., Veilleux L., Grafmueller B., Werninghaus R., Bamler R., Moreira A.: Tandem-L: An innovative interferometric and polarimetric SAR mission to monitor earth system dynamics with high resolution, IEEE IGARSS 2010, DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5650322, pp. 253–256, 2010.
- Lachaise M., Fritz T., Balss U., Bamler R., Eineder M.: Phase Unwrapping Correction with Dual-Baseline Data for the TanDEM-X Mission, IEEE IGARSS 2012 Conference, Munich, 2012.
- Moreira A., Krieger G., Hajnsek I., Hounam D., Werner M., Riegger S., Settelmeier E.: TanDEM-X: A TerraSAR-X Add-On Satellite for Single-Pass SAR Interferometry, IEEE IGARSS Conference, 2004.
- Perissin D., Rocca F., Pierdicca M., Pichelli E., Cimini D., Venuti G., Rommen B.: Mitigation of atmospheric delay in InSAR: The ESA Metawave project, IEEE IGARSS 2011, pp. 2558–2561, 2011.
- Rommen B., Mika A., Gale L., Zelle H., Hanssen R., Shizhuo Liu, Matzler C., Morland J., Wegmüller U., Werner C., Santoro M.: The ESA METAWAVE project: Correcting for atmospheric water vapour effects in InSAR products, IEEE EuCAP 2009. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, pp. 3428–3432, 2009.
- Rosen P.A., Eisen H., Shen Y., Hensley S., Shaffer S., Veilleux L., Dubayah R., Ranson K.J., Dress A., Blair J.B., Luthcke S., Hager B.H., Joughin I.: The proposed DESDynI mission – From science to implementation, IEEE Radar Conference (RADAR), DOI: 10.1109/RADAR.2011.5960710, pp. 1129–1131, 2011.
- Rott H., Eineder M., Nagler T.: New Results on Dynamic Instability of Antarctic Peninsula Glaciers detected by TerraSAR-X Ice Motion Analysis, EUSAR, 2008.
- Rott H., Müller F., Nagler T., Floricioiu D.: The imbalance of glaciers after disintegration of Larsen-B ice shelf, Antarctic Peninsula. The Cryosphere, 5, pp. 125–134, doi:10.5194/tc-5-125-2011, 2011.
- Schubert A., Jehle M., Small D., Meier E.: Mitigation of atmospheric perturbations and solid Earth movements in a TerraSAR-X time-series, Journal of Geodesy, Vol. 86, No. 4, pp. 257–270, 2012.
- Tuttas S.: Joint gravimetric and geometric survey of geophysical signals – feasibility study for the tereno alpine and prealpine ammer observatory, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, IAPG/FESG Schriftenreihe, 2011.
- Yague-Martinez N., Eineder M., Cong X.Y., Minet C.: Ground Displacement Measurement by TerraSAR-X Image Correlation: The 2011 Tohoku-Oki Earthquake, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 9, Iss. 4, pp. 539–543, 2012.
- Yoon Y., Eineder M., Yague-Martinez N., Montenbruck O.: TerraSAR-X Precise Trajectory Estimation and Quality Assessment; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(6):1859–1868 DOI 10.1109/TGRS.2008.2006983, 2008.
- Zhu M., Wadge G., Holley R.J., James I.N., Clark P.A., Changgui Wang, Woodage M.J.: High-Resolution Forecast Models of Water Vapor Over Mountains: Comparison With MERIS and Meteosat Data, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, Iss. 3, DOI: 10.1109/LGRS.2007.895884, pp. 401–405, 2007.
- Zhu X., Bamler R.: Very High Resolution Spaceborne SAR Tomography in Urban Environment, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(12), pp. 4296–4308, 2010.
- Zhu X., Bamler R.: Let's Do the Time Warp: Multi-Component Nonlinear Motion Estimation in Differential SAR Tomography, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 8(4), pp. 735–739, 2011.
- Zhu X., Bamler R.: Super-Resolution Power and Robustness of Compressive Sensing for Spectral Estimation with Application to Spaceborne Tomographic SAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 50(1), pp. 247–258, 2012.

Anschrift der Autoren

Dr. Michael Eineder | Prof. Dr. Richard Bamler | Dr. Thomas Fritz | Xiao Xiang Zhu | Dr. Ulrich Balss | Helko Breit | Nico Adam | Dr. Dana Floricioiu
Institut für Methodik der Fernerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling
michael.eineder@dlr.de

Xiao Ying Cong | Dr. Stefan Gernhardt | Prof. Dr. Richard Bamler
Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung (LMF), Arcisstraße 21, 80333 München