Die Anwendung der satellitengestützten Radarinterferometrie zur großräumigen Erfassung von Höhenänderungen

DR. STEFFEN KNOSPE, DIPL.-ING. HANS-PETER HEBEL, DIPL.-GEOL. MICHAEL SCHÄFER, DIPL.-GEOL. TANJA SCHÄFER, DIPL.-ING. DIANA WALTER UND PROF. DR. WOLFGANG BUSCH

Die Radarinterferometrie ermöglicht die flächenhafte Bestimmung von großräumigen Bodenbewegungen wie sie z.B. durch Rohstoffentnahme und Grundwasserabsenkungen bzw. Massenverlagerungen im Untergrund hervorgerufen werden. Die Radarinterferometrie ist ein berührungsfreies, fernerkundliches Messverfahren mit einem aktiven Sensor. Der deutsche Radarsatellit TerraSAR-X mit einer Bodenauflösung von einem bis zu wenigen Quadratmetern und einer interferometrischen Wiederkehrrate von 11 Tagen bietet besonders gute Möglichkeiten zur großräumigen Erfassung von Höhenänderungen.

Unter dem Begriff Radarinterferometrie sind unterschiedliche Methoden zusammengefasst, mit denen Paare oder Zeitreihen von Radarbildern interferometrisch ausgewertet werden. Es erfolgt eine Phasenvergleichsmessung zur Bestimmung von Abstandänderungen in Blickrichtung des Sensors. Die Radarinterferometrie hat sich in vielen geowissenschaftlichen Anwendungen und in der Rohstoffgewinnung bewährt. Gegenstand derzeitiger Forschungsarbeiten sind die Ableitung von Aussagen zur Verlässlichkeit und zu Genauigkeitsmaßen sowie die Verknüpfung mit Ergebnissen etablierter Messverfahren in der Modellierung.

Im Vortrag werden Bespiele aus der Bearbeitung aktueller Forschungsprojekte vorgestellt und die Möglichkeiten und Grenzen der Radarinterferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen gezeigt.

1. Einleitung

Die Radarinterferometrie ermöglicht die flächenhafte Bestimmung von großräumigen Bodenbewegungen wie sie z.B. durch Rohstoffentnahme und Grundwasserabsenkungen bzw. Massenverlagerungen im Untergrund hervorgerufen werden. Die Radarinterferometrie ist ein berührungsloses, fernerkundliches Messverfahren mit einem aktiven Sensor. Bodenbewegungen sind in der Blickrichtung des Sensors (1D) bestimmbar. In diesem Beitrag wird auf die Erfassung der Vertikalkomponente von flächenhaften Verformungen bzw. vertikalen Bewegungen von Einzelobjekten Bezug genommen.

Die Radarinterferometrie hat in den letzten zwei Jahrzehnten aufgrund der Verfügbarkeit geeigneter abbildender Radarsysteme mit verschiedenen Sensoren im L-Band, C-Band und

X-Band besonders im Bereich der Beobachtung von Bodenbewegungen für verschiedene geowissenschaftliche Fragestellungen erheblich an Bedeutung gewonnen. In den Archiven der Satellitenbetreiber z.B. der europäischen Weltraumorganisation ESA (mit ERS-1 seit 1991, ERS-2 1995 und ENVISAT 2002), des DLR / DFD (TerraSAR-X 2008, TanDEM-X 2010), der JAXA (JERS 1992, ALOS 2006) oder MDA/CSA (RADARSAT-1 1995, RADARSAT-2 2007) werden große Datenmengen gesammelt und Nutzern auch für retrospektive Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Erfolgreiche wissenschaftliche Untersuchungen und Anwendungen rufen in Verbindung mit der Weiterentwicklung von (tlw. kommerziell verfügbarer) Auswertesoftware ein immer stärkeres Interesse auch zur kommerziellen Nutzung dieser Technologie hervor.

Die vom Radarsensor ausgesandten elektromagnetischen Signale werden an der Erdoberfläche größtenteils reflektiert und von der Radarantenne wieder empfangen. Dabei wird die Rückstreuintensität sowie die Phasenlage der Signale gemessen, was es ermöglicht, die Entfernung zwischen dem Sensor und der rückstreuenden Oberfläche zu bestimmen. Durch die Überlagerung von zwei Radaraufnahmen (i.d.R. als synthetic aperture radar, SAR-Szenen) werden Interferogramme erzeugt, die als Messgröße die Phasendifferenz beider Aufnahmen enthalten, aus der kleine relative Bewegungen der Erdoberfläche zwischen beiden Aufnahmezeitpunkten bestimmt werden können.

Über die räumliche Auflösung der Radarbilder entscheiden die Bandbreite der Frequenzmodulierung und die Wellenlänge des Radarsignals sowie die Aufnahmegeometrie (Sensor- bzw. Antennen-Abstand und der Einfallswinkel des Signals zur Erdoberfläche). Das Rückstreuecho eines Pixels setzt sich aus der kohärenten Summe aller Rückstreusignale der in dem jeweiligen Flächenelement vorhandenen Einzelstreuer zusammen. Die Radarinterferometrie erzeugt also nicht nur flächenhaft Daten (SAR-Bilder und Interferogramme) sondern integriert die Rückstreuinformation in der Auflösungszelle zu einem Messwert, der tatsächlich eine reale Fläche repräsentiert.

Die gemessene Phasenänderung ist ein Maß für die Pfaddifferenz des Radarsignals zu beiden Aufnahmezeitpunkten; sie ist mehrdeutig und zusammengesetzt aus der Wirkung von:

- Position der Sensoren über der Topographie,
- Bodenbewegung zwischen den Aufnahmen,
- Atmosphärischer Signalverzögerung bzw. deren Änderung zwischen den Aufnahmen

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Phasenwerte nur modulo 2π bestimmt werden. Hieraus resultiert eine Mehrdeutigkeit bei der Bestimmung der absoluten Bewegungsrate, da die Anzahl eventuell übersprungener Phasenzyklen unbekannt bleibt. Diese Mehrdeutigkeiten können durch räumliche Integration (räumlich konsistente Phasenfortsetzung, "Phasenabwicklung") der relativen Phasen aufgelöst werden ("spatial phaseunwrapping", (GOLDSTEIN ET AL. 1988)). Anschließend können die abgewickelten Phasenwerte in vertikale Höhenänderungen umgerechnet (projiziert) werden. Die Bestimmung von Bodenbewegungen mit Genauigkeiten im Millimeterbereich ist nicht immer möglich. Für radarinterferometrische Messungen wird die Änderung der Phasenverschiebung in zwei exakt koregistrierten SAR-Szenen ausgewertet (Interferogrammberechnung). Die Koregistrierung erfolgt, damit in beiden Szenen die Rückstreuung von den gleichen Objekten pro Pixel verglichen werden kann. Dies impliziert eine der generellen Einschränkungen der Anwendung der Radarinterferometrie, dass sich die Summe der für die Rückstreuung bedeutenden Objekte pro Pixel nicht grundlegend ändern darf, d.h. dass die Aufnahme von nahezu exakt der selben Orbitposition aus gemacht werden muss und wesentliche Objekte nicht hinzugefügt oder entfernt werden dürfen. Eine Veränderung geschieht auch durch Veränderung der rückstreuenden Oberflächen und in bestimmtem Maße auch durch wachsende Vegetation. Wichtigste Voraussetzung für eine erfolgreiche interferometrische Auswertung von Radardaten ist also eine "feste" Phasenbeziehung (Kohärenz, d.h. Ähnlichkeit) zwischen den zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemachten Aufnahmen.

2. Die differentielle Radar Interferometrie

Der Begriff Radarinterferometrie steht heute als Synonym für sehr unterschiedliche methodische Ansätze zur interferometrischen Auswertung von bildhaften Radardaten. Abhängig von der Anwendung und dem Ziel der Auswertung werden verschiedene Methoden eingesetzt, die Ergebnisse in unterschiedlichem Prozessierungsgrad erzeugen. Damit ist die Radarinterferometrie keine reine Messmethode, sondern beinhaltet oft schon eine Weiterverarbeitung der Messgröße z.B. zu Parametern der zu bestimmenden Bodenbewegung. In den erweiterten Methoden der Radarinterferometrie (Stapelverfahren, SBAS, PSI) findet eine Modellierung (Mittelbildung, Regression, Ausgleichung, u. ä.) der Bodenbewegung statt, die mit Hilfe der gemessenen Phasenänderungen beschreibbar wird.

Die grundlegende Methode zur Bestimmung von Bodenbewegungen ist die differentielle Radarinterferometrie (**dInSAR**, (BAMLER ET AL. 1998 und ROSEN ET AL. 2000). Hier wird das Interferogramm zweier Radar-Aufnahmen um den Einfluss der Aufnahmegeometrie und unterschiedlicher Geländehöhen reduziert ("differentiell", s. o.). Nach der Entfernung der orbitund topographiebedingten Phasenanteile erhält man ein differentielles Interferogramm, das im günstigsten Fall nur noch Oberflächendeformation zeigt. Jedoch lassen sich nicht alle unerwünschten Phasenkomponenten unterdrücken. Die differentielle Phase bleibt die Summe aus Bodenbewegung, Orbit-Bestimmungsfehler, DHM-Fehler, großräumigen atmosphärischen Einflüssen (Phasen-Trends und DHM korrelierte atmosphärische Strukturen) sowie lokalen troposphärischen Strukturen und Rauschen. Deshalb wird für die meisten Anwendungen eine Trendreduktion durchgeführt und gefiltert, um das Rauschen zu unterdrücken. Die klassische dlnSAR Methode wird z.B. in geotektonischen Anwendungen genutzt, um Krustenbewegungen im Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen zu untersuchen.

Niedrige Kohärenz und dadurch zeitliche (vor allem bei starker Vegetationsbedeckung) und geometrische Dekorrelation sind oft ein Problem der klassischen dInSAR Methode (ZEBKER ET AL. 1992 und HANSSEN 2001). In Bereichen mit starker Vegetationsbedeckung dekorreliert das Signal schon nach kurzer Zeit. Deshalb ist die Auswahl eines geeigneten Sensors wichtig, da Bodenbewegungen anderenfalls nur eingeschränkt großflächig erfasst werden können.

Langwellige Radarstrahlung besitzt eine bessere Durchdringungsfähigkeit (z.B. der Vegetation), weshalb die Verwendung von Daten des japanischen ALOS Satelliten mit einem L-Band Sensor (Wellenlänge 23,6 cm) gegenüber ERS / ENVISAT und RADARSAT (C-Band: 5,6 cm) oder TerraSAR-X / TanDEM-X und COSMO-SkyMed 1-4 (X-Band: 3,1 cm) in ländlichen Gebieten geeigneter ist, Abbildung 1.



Abbildung 1: Vertikale Höhenänderungen abgeleitet aus einem Radarinterferogramm, ALOS PALSAR Juni 2007 - Oktober 2007 (138 Tage); ein Farbzyklus entspricht 15,1 cm Höhenänderung.

Die höhere Sensitivität im X-Band gegenüber sehr kleinen Bewegungsraten bedeutet auch eine höhere Sensitivität gegenüber Vegetationseinflüssen. Sie kann durch die kürzere interferometrische Wiederkehrrate (11 gegenüber 35 Tagen für ENVISAT) und die hohe räumliche Auflösung von TerraSAR-X Daten kompensiert sein, wie von BAMLER ET AL. (2006) vermutet. Im Vergleich zu ENVISAT können mit TerraSAR-X und ALOS deutlich schnellere Bewegungen und größere Bewegungsgradienten (ENVISAT ASAR: 3 mm/m pro 35 Tage, TerraSAR-X: 20 mm/m pro 11 Tage, ALOS PALSAR: 28 mm/m pro 46 Tage) erfasst werden. Die höhere Sensitivität von X- und C-Band Sensoren gegenüber Vegetationseinflüssen führt zu starken Dekorrelationseffekten in der Vegetationsperiode.

In räumlich hochauflösenden Daten wechseln sich "Vegetationspixel" mit "Objektpixeln" ab. Dies führt zu Datenlücken und Problemen bei der Phasenabwicklung (unwrapping) in der dlnSAR Auswertung. Bei der Untersuchung großflächiger Phänomene können durch die Anwendung von multilooking solche Probleme vermieden werden. Die Anwendung der **multi-looking-Methode** (entspricht einer Mittelwertbildung mit Reduktion der geometrischen Auflösung) führt auch zur Reduktion des Rauschenanteils und ist u. U. für eine erfolgreiche Phasenabwicklung notwendig.



Abbildung 2: Vertikale Höhenänderungen abgeleitet aus einem Radarinterferogramm, TerraSAR-X, 6x5 multilooking: Reduktion der Auflösung auf ca. 9 m × 10 m, 20080125-20080205 (11 Tage), Einfluss des Steinkohlenbergbaus im Lippegebiet (zwischen Dorsten und Haltern am See), in Radarkoordinaten, ein Farbzyklus entspricht 2 cm Höhenänderung.

Die Anwendung der dlnSAR Methode soll am Beispiel eines von Untertagebergbau beeinflussten Gebietes detailliert beschrieben werden. Die Rohstoffentnahme im untertägigen Steinkohlenbergbau führt zu Senkungen der Tagesoberfläche. Die Nutzbarkeit der Radarinterferometrie zur großflächigen Überwachung mit aktuell verfügbaren Satellitendaten wird am IGMC u.a. in Zusammenarbeit mit der RAG Deutsche Steinkohle seit 2004 im Rahmen von F&E-Projekten untersucht (SPRECKELS ET AL. 2008). Aufgrund der noch zu erwartenden Bodensenkungen sowie den unbekannten Folgewirkungen des Grubenwasseranstiegs durch Einstellung der Wasserhaltung nach der geplanten Stilllegung der Steinkohleförderung in 2018, bemühen sich Behörden und die RAG als Bergbauunternehmen um ein nachhaltiges und zukunftsfähiges Überwachungskonzept im Ruhrgebiet und Saarland, bei dem auch Radardaten zum Einsatz kommen sollen.

Bei großräumigen Betrachtungen von Gebieten mit verstärkt ländlichem Charakter, wie sie im nördlichen Ruhrgebiet bei den derzeit aktiven Bergwerken anzutreffen sind, liefert die dInSAR-Methode abhängig von den hier verwendeten Sensoren (ENVISAT-ASAR, TerraSAR-X, ALOS PALSAR) unterschiedliche Ergebnisse bzgl. der Ableitung von Bodenbewegungen.

Mit TerraSAR-X können schnelle Bewegungen und größere Bewegungsgradienten aufgrund der höheren Bodenauflösung und der interferometrischen Wiederkehrrate von 11 Tagen gut erfasst werden. Aufgrund der kleineren Wellenlänge dekorreliert das Signal in land- und forst-

wirtschaftlich genutzten Flächen schnell, Abbildung 3. Bei TerraSAR-X sind i.d.R. nur Winter-Interferogramme zur großflächigen Ableitung von Bodenbewegungen im ländlichen Bereich nutzbar.

Der ALOS PALSAR Sensor (L-Band, Wellenlänge 23,6 cm) liefert auch in ländlichen Gebieten ganzjährig kohärente Daten. Abbildung 4 zeigt, dass auch Interferogramme für relativ lange Zeiträume in Vegetationsbereichen gute Kohärenzen besitzen (vergleiche auch Abbildung 1), die eine flächenhafte Ableitung von Deformationen ermöglichen.



Abbildung 3: Vertikale Höhenänderungen abgeleitet aus Radarinterferogrammen, TerraSAR-X Juni 2007 -Oktober 2007 (138 Tage); v.l.n.r.: 11 Tage, 22 Tage, 33 Tage und 55 Tage, ein Farbzyklus entspricht 2,06 cm Höhenänderung.

Dieses Beispiel verdeutlicht auch den Nutzen der dInSAR-Auswertungen hinsichtlich der Erfassung nichtlinearer Bewegungen bei Zu- und Abnahme der Senkungsgeschwindigkeiten.



Abbildung 4: Zu- und wieder Abnahme der Senkungsraten eines aktiven Baufeldes im Steinkohlenbergbau, ALOS PALSAR 46 Tage Interferogramme v.l.n.r.: 06/2007 - 07/2007, 10/2007 - 12/2007, 12/2007 -01/2008, ein Farbzyklus entspricht 10 cm Höhenänderung.

Genauigkeitsanalysen zeigen im Mittel Differenzen von 3 mm zwischen PALSAR DInSAR-Messungen und Nivellements, jedoch mit einer Standardabweichung von 14 mm. Im Gegensatz dazu betragen die mittleren Differenzen bei TerraSAR-X nur 0.4 mm mit einer Standardabweichung von ca. 4 mm, (WALTER ET AL. 2008).

Bedeutendster Fehlereinfluss bei der satellitengestützten Radarinterferometrie sind atmosphärische Störungen. Diese entstehen im Wesentlichen durch Temperatur- und Luftdruckunterschiede (stark mit der Topographie korreliert) sowie durch unterschiedlichen Wasserdampfgehalt in der Troposphäre. Bodenbewegung und troposphärischer Signalanteil sind räumlich stark auto-korrelierte Phänomene. Die räumlichen Strukturen können sehr ähnlich sein, wobei "Atmosphärenstrukturen" mit cm bis dm "Deformationsäquivalent" keine Seltenheit sind, siehe diffuse Anomalien in Abbildung 2. Die Trennung von Bodenbewegungskomponente und atmosphärischer Störung in Einzelinterferogrammen (dInSAR) ist deshalb problematisch (KNOSPE ET AL. 2010a).

Eine einfache und nur bedingt anwendbare Methode zur Reduktion atmosphärischer Phasenanteile soll am Beispiel der Bestimmung von Höhenänderungen über einer Erdöl-/Erdgaslagerstätte im Folgenden gezeigt werden.

Das Untersuchungsgebiet San Jorge Becken in Argentinien liegt in einem arid geprägten Klimaraum und ist daher für die Radarinterferometrie auch bei langen Zeitdifferenzen gut geeignet, da nahezu keine Störeinflüsse durch eine sich ändernde Vegetationsbedeckung vorkommen. Nachteilig ist, dass in diesem Klima atmosphärisch bedingte Störeinflüsse weitaus dominanter sein können und deshalb unbedingt behandelt werden müssen.

Zu diesem Zweck wurde in diesem Beispiel ein Verfahren angewendet, bei dem die niedrigfrequenten Anteile der Phasenwerte eines differentiellen Interferogramms ermittelt und aus dem Interferogramm entfernt werden. Damit wird in diesem Beispiel der überwiegende Teil der atmosphärischen Störeinflüsse reduziert. Die Untersuchung großräumiger (niedrig-frequenter) Bodenbewegungen ist nicht mehr möglich, was für diese Anwendung nicht notwendig war. Übrig bleiben die hochfrequenten (kleinräumigen) deformationsbedingten Phasenanteile (aber auch kleinräumige atmosphärische Strukturen).

Im Untersuchungsgebiet kommt es zu Höhenänderungen der Geländeoberfläche in Folge von intensiver Erdöl- und Erdgasförderung. Die hier gezeigten Ergebnisse basieren auf ENVISAT-ASAR Daten. Es standen lediglich 6 Aufnahmen für den Zeitraum 2003 bis 2007 zur Verfügung, weshalb nur einzelne differentielle Interferogramme ausgewertet werden konnten; Ausschnitt ca. 40 \times 50 km² in der Abbildung 5.

Abbildung 5 zeigt den Vorgang der verwendeten Atmosphären-Korrektur. Ausgehend von dem differentiellen Interferogramm (Abbildung 5a) werden die niedrig-frequenten Anteile mit Hilfe eines Lowpass-Filters mit anisotropen Kernel ermittelt (Abbildung 5b) und von dem Interferogramm abgezogen. Übrig bleiben die höher-frequenten Anteile: kleinräumige Atmosphäre sowie Deformation (Abbildung 5c).

Diese Bodenbewegungen führen im Bereich der Förderbohrungen sowie von Infrastruktureinrichtungen (Öl-/Gas-Pipelines, Verkehrsanlagen, Ver- und Entsorgungsleitungen) und Gebäuden zu Schäden, vor allem, wenn kleinräumig unterschiedliche vertikale Bewegungsraten auftreten, wodurch Zerrungs- (Dehnungs-) und Pressungserscheinungen entstehen. In dem beobachteten Zeitraum konnten maximale vertikale Bewegungsraten von 12 cm pro Jahr ermittelt werden. Überwiegend wurden Hebungen beobachtet, vermutlich durch die Injektion von Wasser oder Wasserdampf in den Untergrund im Zuge der Sekundärförderung. Stellenweise wurden durch die Bodenbewegungen tektonische Störungen aktiviert, erkennbar durch



Abbildung 5: Differentielles Interferogramm aus ENVISAT-ASAR Daten mir stark ausgeprägter Atmosphäre (a) im Bereich des Untersuchungsgebietes Argentinien; nach Reduktion des niedrig-frequenten Atmosphärensignals (b) von (a) ergibt sich das gewünschte Nutzsignal ohne störende, großräumige Atmosphäreneinflüsse (c). Das rote Rechteck zeigt den Detailbereich von Abbildung 6.

ein unterschiedliches Bewegungsverhalten beiderseits der Störung, Abbildung 6 (SCHÄFER & HABBEN 2009).

Abbildung 6 zeigt eines der detektierten Bewegungsgebiete. In der Darstellung der Höhenänderung sind direkt aneinander grenzende Bereiche mit unterschiedlich starken Hebungswerten zu erkennen. Anhand dieser Unstetigkeiten können drei SSW-NNE verlaufende tektonische Störungen sicher kartiert werden.

3. Die erweiterten Methoden der Radarinterferometrie für Monitoringaufgaben

Zeitreihenuntersuchungen im Sinne eines Monitoring erfordern die Verarbeitung von Serien (bzw. Stapeln) von Radaraufnahmen bzw. von Interferogramm-Zeitreihen. Einfache Methoden von Summen- oder Mittelwertbildung werden unter dem Begriff **stacking** zusammengefasst. Das Stacking von Interferogrammen führt zu einer wesentlichen Reduktion des Signalrauschens und troposphärischer Einflüsse, wohingegen sich gleichgerichtete Bewegungen summieren. Es wird eine Gesamtbewegung (Summenbildung) bzw. Bewegungsrate (Mittelwertbildung) für den betrachteten Zeitraum berechnet.

Durch eine statistische Nachbearbeitung bzw. Weiterverarbeitung der dlnSAR Ergebnisse im Sinne eines Stackings wird die Zuverlässigkeit der Ergebnisse verbessert und der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Messverfahren erleichtert, siehe Abbildung 7. In Summen von kohärenten Kurzzeitinterferogrammen werden gleichgerichtete Bewegungsbeträge summiert und zufällige Fehler heben sich gegenseitig auf. Beim Einsatz von TerraSAR-X Daten sind diese Summen "Langzeitinterferogrammen" vorzuziehen, (KNOSPE ET AL. 2010b). Zur Veranschaulichung sollen hier Ergebnisse aus dem BMWi-geförderten Forschungsvorhaben "Rada-



Abbildung 6: Vereinfachter Prozessierungsablauf der differentiellen Interferogramme; atmosphären-korrigiertes differentielles Interferogramm(a), Projektion in vertikale Höhenänderungen(b) und Isoliniendarstellung (c) zusammen mit einer tektonischen Interpretation (schwarze Störungslinien); Größe des Ausschnitts ca. 4,5 × 6,5 km².

rinterferometrische Überwachung von vertikalen Bodenbewegungen im Bereich der Emscher" präsentiert werden.

Das Untersuchungsgebiet ist der zentrale Teil des Ruhrgebietes. Der Norden und Westen ist ländliches Gebiet, das teilweise durch den aktiven Steinkohlenbergbau beeinflusst ist, siehe Abbildung 2. Der zentrale Teil ist Stadtgebiet mit Altbergbauerscheinungen und den kleinräumigen Bodenbewegungen im Zusammenhang mit den Tunnelbaumaßnahmen entlang der Emscher und ihrer Nebenflüsse.

Der im Projekt verwendete Datenstapel umfasst mittlerweile 76 Szenen, die Zeitreihe wurde mit der ersten bestellbaren TerraSAR-X Aufnahme am 25. Januar 2008 begonnen. In der dInSAR Auswertung, die für Teilgebiete < 100 km² durchgeführt wurde, werden großräumige atmosphärische Störeinflüsse durch Trendreduktion eliminiert. Als absolute Höhenreferenz wird ein SRTM-X DHM mit 25 m × 25 m Auflösung verwendet.

Trotz der höheren Sensitivität des X-Band Radars (kürzere Wellenlänge) profitiert man beim Einsatz von TerraSAR-X Daten für die Messung starker Bodenbewegungen wegen der größeren räumlichen und zeitlichen Auflösung im Vergleich zu anderen Satellitensensoren.

Kurzzeit-Interferogramme (mit 11 oder 22 Tage Intervall) besitzen flächenhaft hohe Kohärenzen und liefern dadurch für weite Teile der Radarszene zuverlässige Messergebnisse. In der Vegetationsperiode sind ländliche Teilgebiete aber generell stärker verrauscht. Für großräumige Betrachtungen, wie in Abbildung 2 dargestellt, kann die räumliche Auflösung zur Verbesserung der Kohärenz reduziert werden (multilooking). Noch mehr als die hohe räumliche Auflösung ist die zeitliche Auflösung von 11 Tagen ein wesentlicher Vorteil von TerraSAR-X im Vergleich mit anderen Radarsatelliten und bedeutend für die Qualität der Ergebnisse.



Abbildung 7: Vertikale Höhenänderungen in 77 Tagen abgeleitet aus TerraSAR-X dInSAR Ergebnissen, Profillinie über der gebauten Tunnelachse entlang einer Autobahn, links: Höhenänderung in der Summe aus sieben 11 Tage Interferogrammen; gelb = Senkung, rechts ist eine Kohärenzkarte (zeitliches Mittel: rot = geringe Kohärenz in Laubwald- und overlay-Bereichen).

Eine Weiterverarbeitung der dlnSAR Ergebnisse erfolgt im Sinne eines Stackings; Kurzzeitinterferogramme werden zur Bestimmung von Höhenänderungen summiert, Abbildung 7. Zusätzlich werden auf den Profilen, die durch Nivellementszüge vorgegeben sind, die Werte aus der räumlichen Nachbarschaft entlang der Profillinie gemittelt, Abbildung 8 (siehe KNOSPE ET AL. (2010b) und HANNEMANN ET AL. (2011)).

Eine temporale Analyse einer Zeitreihe von SAR-Szenen bzw. von Interferogrammen ermöglicht es, auch sehr kleine relative Bewegungen der Erdoberfläche zu erfassen. Zur multitemporalen Verarbeitung von SAR-Datenstapeln kann die klassische Small Baseline Methode (**SB-Methode** nach USAI (2001, 2003)) verwendet werden. Auf der Grundlage von multiplen Stapeln (mit Beschränkung auf kurze zeitliche und/oder räumliche Basislinien) von Interferogramm-Zeitreihen (mit Überbestimmung durch Mehrfachnutzung der Radarszenen in Interferogrammen) kann ein Ausgleichungsansatz verwendet werden, um den Bewegungsverlauf besonders kohärenter Pixel zu schätzen, einschließlich der Durchführung von iterativen Ausreißertests zur Grobfehlerdetektion (unwrapping-Fehler).

Wesentlich für diese Methode ist die Auswahl der kohärenten Pixel (wobei die geometrisch Auflösung zur Kohärenzverbesserung zum Teil stark reduziert werden muss, um eine korrekte Phasenabwicklung zu garantieren), aus denen der Messwertvektor gebildet wird. Im Gegensatz zur klassischen SB-Methode, wo nur die Gesamtkohärenz als Qualitätskriterium verwendet wird, können auch nur die tatsächlich relevanten, objektspezifischen Teile der Kohärenz benutzt werden (GE ET AL. 2009).

Einen Ausweg beim großflächigen Verlust der Kohärenz bieten die Methoden der Persistent Scatterer Interferometry (**PSI**, FERRETTI ET AL. (2001) und WERNER ET AL. (2003)). Hier werden in möglichst langen Zeitreihen von SAR-Szenen stabile Punktstreuer, die immer in ähnlicher Weise rückstreuen und eine Auflösungszelle (ein Pixel) dominieren, in ihrer zeitlichen (Phasen-) Änderung betrachtet. Insbesondere Daten mit hoher Bodenauflösung



Abbildung 8: Vertikale Höhenänderungen abgeleitet aus TerraSAR-X dInSAR Ergebnissen, Profile über der gebauten Tunnelachse, geplante Tunnelachse bei 40 m; Mittelung der Werte in einer Umgebung von 6 m um Profillinie, Darstellung der Summen von zeitlich aufeinanderfolgenden 11-Tage-Interferogrammen, grün: 3 mal 11 Tage, blau: 4 mal 11 Tage, gelb: 5 mal 11 tage, rot: 7 mal 11 Tage, schwarze durchgezogene Linie zeigt den Zeitraum vor der Unterfahrung (3 mal 11 Tage); grau: mittlere Kohärenz mit Schwellwert 0,25.

(z.B. TerraSAR-X) liefern eine sehr große Anzahl detektierbarer Punktstreuer. Diese sog. persistenten Streuer (PS) mit stabilen Rückstreueigenschaften sind z.B. Gebäudestrukturen, Verkehrswege, Masten, Industrieanlagen, etc., weshalb sich diese Verfahren besonders zur Überwachung von Bodenbewegungen in dicht besiedelten Gebieten eignen. Es wird für jeden Punktstreuer ein Modell der Phasenkomponenten aufgestellt und in einer iterativen Auswertung parametrisiert. Die Auswertung basiert gewöhnlich auf einer zweidimensionalen linearen Regression, in der die lineare Deformationsrate und eine Höhenkorrektur bestimmt werden und auch das phase-unwrapping gelöst wird. Eine räumliche Phasenabwicklung ist dann nicht mehr notwendig. Die Residuen werden danach einer iterativen Analyse zur Abspaltung weiterer Signalkomponenten unterzogen, das Ergebnis aus den relevanten Komponenten zusammengesetzt. Ein Nachteil dieser Verfahren ist der Verlust des flächenhaften Charakters der Bodenbewegungsmessung.

Künstliche Radar-Reflektoren (ACR) stellen definierte und persistente, punkthafte Rückstreuer dar, die dort aufgestellt werden, wo eine Messung erzwungen werden muss oder um Referenzpunkte für die Verknüpfung (oder den Vergleich) mit anderen Messverfahren zu schaffen.

Die Anwendung der PSI Methode wird am Beispiel der retrospektiven Erfassung von Höhenänderungen über dem Untertageerdgasspeicher (UGS) Berlin gezeigt. Es ist ein Beispiel für die großräumige Anwendung der punktbasierten Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), vergleiche auch KUEHN ET. AL. (2009). Über dem in einer Tiefe von ca. 800 m unter NN gelegenen Aquifer-Speicher (SCHNEIDER ET AL. 2002) sind Höhenänderungen der Tagesoberfläche nach Änderungen des Speicherdrucks zu beobachten.



Abbildung 9: Persistent Scatterer Punkte im westlichen Teil Berlins (Ausschnitt 600 km²), klassifiziert nach linearer Bewegungsrate, mit Hebung (blau) im Bereich des UGS Berlin.

Für den ca. 600 km² großen Bereich in Abbildung 9, der den westlichen Teil des Großraums Berlin darstellt, konnten für einen Zeitraum von mehr als acht Jahren aus 65 Szenen der Satelliten ERS-1 und ERS-2 Höhenänderungen bestimmt werden. Als Ergebnis dieser Auswertung ist es gelungen, die mit der Druckerhöhung bei der Befüllung des Gasspeichers einhergehende Hebung der Tagesoberfläche räumlich und auch in ihrem zeitlichen Verlauf (siehe Abbildung 10) zu charakterisieren. Diese Ergebnisse sollen in ein Monitoringkonzept eingebunden werden, in das auch Betriebsparameter des Speichers und weitere Umweltinformationen einfließen.

Eine Übersicht zur klassischen dInSAR Methode, zur Persistent Scatterer Interferometry, sowie weiteren Methoden zur Erfassung von Bodenbewegungen unter Nutzung radarinterferometrischer Zeitreihen (SB-Methoden), ist bei LEIJEN ET AL. (2004) zu finden.



Abbildung 10: Zeitreihe einzelner Persistent Scatterer Punkte im Zentrum der Hebung mit linearem Anstieg und Abklingen der Hebung gegen Ende des betrachteten Zeitraums.

4. Weiterverarbeitung für Monitoringaufgaben

In den Modellierungsschritten der erweiterten Methoden der Radarinterferometrie findet schon eine Weiterverarbeitung der radarinterferometrischen Messung im Sinne der Ableitung zeitlicher Modellparameter einer vermuteten Bodenbewegung statt.

In einer integrierten Weiterverarbeitung lassen sich unabhängige Messungen (z.B. Nivellements) und Zusatzinformationen einfügen oder Verifizierungen durchführen. Für die Visualisierung und Datenvergleiche bietet sich eine GIS Umgebung an. Für diese Zwecke wurde am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen eine ArcGIS Erweiterung entwickelt, um unterschiedliche Messwerte in einer gemeinsamen Datenbank speichern und mit entsprechenden Werkzeugen (Punkt-Umgebung-basierend, Profilkonstruktion) bearbeiten zu können, siehe KAMPHANS ET AL. (2008) und HANNEMANN ET AL. (2011).

Der Einsatz dieser ArcGIS Erweiterung wird am Beispiel der Bestimmung von Höhenänderungen in der Stadt Berezniki (ca. 170 km nördlich der Regionshauptstadt Perm) illustriert. Diese Werkzeuge wurden auch zur Erstellung der Abbildung 8 genutzt, s.o.

Die Stadt Berezniki hat ca. 170.000 Einwohner und liegt am westlichen Rand des Ural an der Kama und ist durch Bergbau- und Industrie-Unternehmen geprägt. Durch eine untertägige Havarie im 1. Kalibergwerk BKPRU-1 der Firma Uralkali in Berezniki ist seit dem 28. Oktober 2006 der Abbau stillgelegt. Die darauf folgende Flutung der Grube führte zu fortschreitenden Höhenänderungen der Tagesoberfläche und zu mehreren Tagesbrüchen. Zur

S. Knospe et al.

Erfassung und Dokumentation der an der Tagesoberfläche eintretenden Höhenänderungen werden seit 2006 die verfügbaren Radardaten des europäischen Satelliten ENVISAT genutzt und seit Anfang 2008 auch alle 11 Tage TerraSAR-X-Daten aufgezeichnet. Ausgewertet wird mit dem dInSAR-Verfahren. Zusätzlich werden auch punktbezogene Auswertungen mit einem PSI-Ansatz durchgeführt.

Im Untersuchungsgebiet traten teils sehr hohe Senkungsraten in Kombination mit einer kleinräumigen Ausdehnung des Senkungsgebietes auf. Dies führt dazu, dass die Phasenabwicklung für Interferogramme, die über einen größeren Zeitraum reichen (in vielen Fällen schon bei > 22 Tagen), nicht mehr korrekt gerechnet werden kann. Um dennoch Aussagen über längere Zeiträume treffen zu können, wurden die Auswerteergebnisse aus 11-Tage-Interferogrammen herangezogen und aufsummiert, Abbildung 11.



Abbildung 11: Linien gleicher Senkung (in Millimetern) im Gebiet "Eisenbahn" für den Zeitraum 03.05.2008 bis 17.11.2008 (198 Tage; Summe aus 18 aufeinander folgenden 11-Tage-Interferogrammen).

Für dieses Anwendungsbeispiel wurden für unterschiedliche Zeiträume dInSAR-Ergebnisse aus ENVISAT-Daten mit den Ergebnissen aus TerraSAR-X-Daten verglichen. Um die Vergleich-

barkeit der Ergebnisse mit sehr unterschiedlicher räumlicher Auflösung zu verbessern, wurden Profillinien durch die Senkungsgebiete definiert und entlang dieser Profillinien die Senkungswerte für annähernd gleiche Zeiträume mit annähernd gleichen Start- bzw. End-Zeitpunkten aufgetragen. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 12.



Abbildung 12: Zeit-Senkungsdiagramme entlang einer Profillinie in Abbildung 11, Vergleich von ENVISAT-ASAR und TerraSAR-X Ergebnissen.

5. Zusammenfassung

Trotz der Erfolge der Radarinterferometrie haben sich die Verfahren zur Erfassung von Bodenbewegungen noch nicht vollständig etabliert. Eine Ursache dafür ist, dass die Verfügbarkeit der Daten nicht garantiert und die Qualität von interferometrischen Ergebnissen bisher nicht in jedem Anwendungsfall quantifiziert werden kann. Die Bestimmung von Bodenbewegungen mit Genauigkeiten im Millimeterbereich ist nur unter günstigen Bedingungen möglich, z.B. in Gebieten mit geringer Vegetation, sowie in Zeiten geringer atmosphärischer Beeinflussung oder aber in einer Zeitreihenauswertung mit erweiterten Methoden der Radarinterferometrie. Die Erfassung sehr hoher Bodenbewegungsraten ist problematisch. Abhängig von der geometrischen und zeitlichen Auflösung erzeugen starke Senkungsgradienten Phasenabwicklungsfehler, die nur mit Zuhilfenahme unabhängiger Informationen (Nivellements, Modelle) gelöst werden können. Entscheidenden Einfluss hat die interferometrische Wiederkehrrate, d.h. die zeitliche Auflösung bzw. Diskretisierung von Zeitreihen von Radardaten, die für derzeit nutzbare Satellitensensoren bestenfalls 11 Tage (TerraSAR-X) beträgt.

In diesem Beitrag wird die Anwendung der Radarinterferometrie bei Nutzung der verschiedenen Satellitensensoren gezeigt, die in unterschiedlichen Frequenzbändern arbeiten und Daten mit unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung (interferometrische Wiederkehrrate) erzeugen. Es wird versucht deutlich zu machen, dass die Radarinterferometrie prädestiniert für Monitoringaufgaben ist, da die Messung flächenhaft ist und die eigentliche Messgröße der Phasenvergleichsmessung eine relative (Abstands-) Änderung beschreibt. Andererseits steht der Begriff Radarinterferometrie aber i.d.R. nicht für eine reine Messmethode, sondern beinhaltet in den erweiterten Methoden weiterverarbeitende Modellierungsschritte bis hin zur Schätzung von Parametern, die Bodenbewegungsphänomene beschreiben.

Danksagung

Die TerraSAR-X Daten wurden vom DLR im Rahmen der Projekte GEO0165, GEO0295 und GEO0348, die ALOS PALSAR Daten von der JAXA im Rahmen von JAXA's RA Program Project 094 und ALOS ADEN Program Project 3576 zur Verfügung gestellt. Dem wissenschaftlichen Koordinator der TerraSAR-X Mission beim DLR danken wir für die Unterstützung und die Bereitstellung des SRTM-X Geländemodells. Der Firma GASAG sei gedankt für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der PSI-Ergebnisse über dem Gasspeicher Berlin. Für die Berechnung differentieller SAR Interferogramme und PSI Auswertungen wurde die von der Firma GAMMA Remote Sensing AG (Gümligen, Schweiz) entwickelte Software verwendet.

Literatur

- GOLDSTEIN, R. M., H. A. ZEBKER & C. L. WERNER (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, Radio Sci., vol. 23, pp. 713-720.
- $\rm B_{AMLER}, \, R. \ \& \ P. \ Harrl (1998).$ Synthetic aperture radar interferometry, Inverse Problems, vol. 14, pp. R1-R54
- Rosen, P. A., S. HENSLEY, I. R. JOUGHIN, F. K. LI, S. N. MADSEN, R. RODRIGUEZ & R. M. GOLDSTEIN (2000). Synthetic aperture radar interferometry, Proceedings IEEE, vol. 88 (3), pp. 333-382
- $\label{eq:Zebker, H.A. & J. VILLASENOR (1992). Decorrelation in interferometric Radar echoes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30 (5), 950-959.$
- HANSSEN, R. F. (2001). Radar Interferometry Data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands

BAMLER, R., B. KAMPES, N. ADAM & S. SUCHANDT (2006). Assessment of slow deformation and rapid motions by radar Interferometry, GIS - Geo-Informationssysteme, Zeitschrift für Geo-Informationssysteme (GIS), 7/2006, S. 22-27

- SPRECKELS, V., D. WALTER, U. WEGMÜLLER, J. DEUTSCHMANN & W. BUSCH (2008). Nutzung der Radarinterferometrie im Steinkohlenbergbau, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 7/2008, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, ISSN 002-5968, pp. 253-261
- WALTER, D., U. WEGMÜLLER, V. SPRECKELS & W. BUSCH (2008). Application and evaluation of ALOS PALSAR data for monitoring of mining induced surface deformations using interferoemtric techniques, Proceedings of The 2nd Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes, Nov 3-7, 2008, Rhodes, Greece. ESA SP-664 (CD-ROM), ESA Publications Division, ESA, Noordwijk, The Netherlands
- KNOSPE, S. & W. BUSCH (2010). Messung kleinräumiger Bodenbewegungen mit TerraSAR-X Radar-interferometrie und Nachbearbeitung für den Vergleich mit Nivellements, 11. Geokinematischer Tag, 6. und 7. Mai 2010. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2010-1, S. 327 - 338. VGE Verlag GmbH, Essen
- SCHÄFER, M. & M. HABBEN (2009). Höhenänderungen durch Erdöl-/Erdgasförderung im Bereich des San Jorge Beckens detektiert mit satellitengestützter Radarinterferometrie, DGMK Tagungsbericht 2009-1, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung, 27.-28. April 2009, Celle
- KNOSPE, S. & S. JÓNSSON (2010). Covariance Estimation for dInSAR Surface Deformation Measurements in the Presence of Anisotropic Atmospheric Noise, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48 (4), part II, pp. 2057-2065
- USAI, S. (2001). A New Approach for Long Term Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry, PhD thesis, Delft University of Technology.
- $\rm U_{SAI},~S.$ (2003). A least squares database approach for SAR interferometric data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41 (4)
- GE, N., S. KNOSPE & W. BUSCH (2009). Deriving High-Resolution Non-Linear Deformation Time Series from TerraSAR-X Interferograms with the Method of Least Squares, Proceedings of ESA Fringe Workshop 2009, 30.11. - 4.12. 2009, Frascati, Italy, ESA SP-677, ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- FERRETTI, A., C. PRATI & F. ROCCA (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39 (1), pp. 8f20
- WERNER, C., U. WEGMÜLLER, T. STROZZI & A. WIESMANN (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping, Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '03. Proceedings IEEE, vol. 7, pp. 4362-4364, 21-25. July 2003
- KÜHN, F., P. HOTH, M. STARK, R. BURREN & J. HOLE (2009). Experience with Satellite Radar for Gas Storage Monitoring. Erdöl Erdgas Kohle, 125. Jahrgang, Heft 11, S. 452-460
- SCHNEIDER, A., M. STARK & W. LITTMANN (2002). Erdgasspeicher Berlin Methoden der Betriebsführung, Erdöl Erdgas Kohle, 118 Heft 11, S. 508-513.
- LEIJEN, F. J. V. & R. F. HANSSEN (2004). Deformation monitoring using radar interferometric time series: a review of methodologies, GPS Nieuwsbrief, 19e jaargang, no. 1, mei 2004, pp. 33-39
- KAMPHANS, K., D. WALTER, W. HANNEMANN, W. BUSCH, V. SPRECKELS & P. VOSEN (2008). GIS-Einsatz im Monitoring bergbaubedingter Oberflächenbewegungen, In: Strobl, Blaschke, Griesebner (Hrsg.): Angewandt Geoinformatik 2008. Beiträge zum 20.
 AGIT-Symposium Salzburg, H. Wichmann Verlag, Heidelberg 2008, S. 572-577

 $\label{eq:Hannemann} \begin{array}{l} Hannemann, \, W., \, T. \, Brock \ \& \ W. \ Busch \mbox{(2011)}. \ GIS \ for \ combined \ storage \ and \ analysis \ of \ data \ from \ terrestrial \ and \ synthetic \ aperture \ radar \ remote \ sensing \ deformation \ measurements \ in \ hard \ coal \ mining, \ Int. \ J. \ Coal \ Geol. \ \ (2011), \ in \ press, \ doi:10.1016/j.coal.2010.12 \end{array}$