

Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung

Uwe Sörgel, IPI, Hannover

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Aufsatz soll zum einen der aktuelle Stand der Radarfernerkundung aufgezeigt sowie auf aktuelle Entwicklungen hinsichtlich Sensorik und Auswertung eingegangen werden. Zum anderen sollen die einschlägigen Arbeiten am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover vorgestellt sowie die für die Zukunft geplanten wissenschaftlichen Themen dargelegt werden. Zunächst erfolgt ein Überblick der Radarfernerkundung mit Fokus auf dem bildgebenden Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Danach wird die Problematik der Erfassung von Siedlungsgebieten mit SAR betrachtet - ein Thema, das durch die zunehmende Verstädterung an Bedeutung gewinnt. Rückschlüsse auf die Natur von Flächen und Objekten auf der Erdoberfläche erlaubt die Analyse der polarimetrischen Streumatrix. Schließlich werden Verfahren vorgestellt, mit denen durch interferometrische Verarbeitung von SAR-Bildern Geländemodelle erzeugt oder Geländebewegungen erfasst werden können.

1. EINLEITUNG

In der Fernerkundung kommen zunehmend luftgestützte oder satellitengetragene Radarsysteme zum Einsatz, die das Spektrum der Millimeter- und Zentimeterwellen abdecken (sogenannter Mikrowellenbereich). Die Radarinformation stellt eine wertvolle Ergänzung zu passiven Sensoren dar, die den sichtbaren oder infraroten Spektralbereich nutzen (Fig. 1). Da der Sensor im Allgemeinen die Szene aktiv beleuchtet, ist er unabhängig von der Tageszeit. In den langwelligen Frequenzbändern (Zentimeterbereich) ist die Signaldämpfung durch Witterungseinflüsse gering.

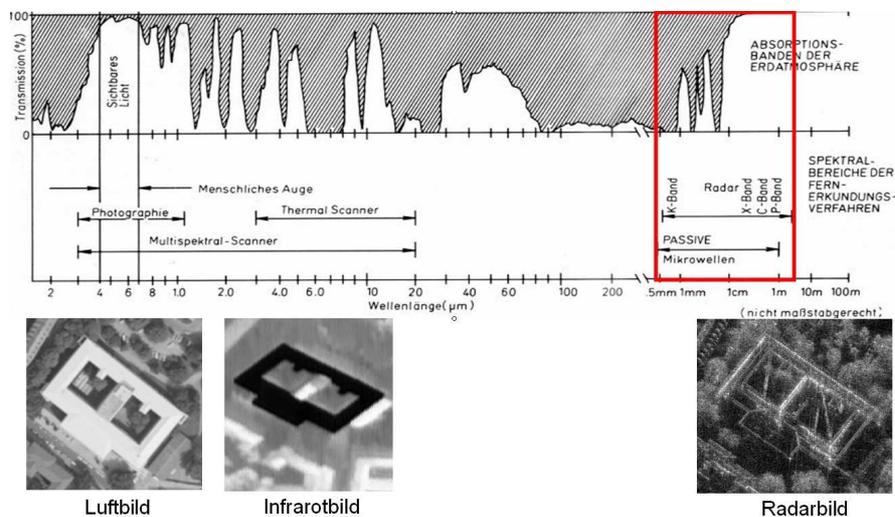


Figure 1: Spektralbereiche der Fernerkundung, Mikrowellenbereich: etwa 1mm – 1m Wellenlänge

Die Nutzung des Mikrowellenbereiches zur Erdbeobachtung bietet sich für eine Reihe unterschiedlicher Zwecke an, die mit verschiedenen Techniken angegangen werden. Die wichtigsten darunter sind:

Radiometer: Passive Messinstrumente, die vor allem zur Bestimmung des Flüssigwasser- und Dampfgehalts der Atmosphäre eingesetzt werden.

Altimeter: aktive Instrumente, die in Nadirrichtung kurze Pulse aussenden und die Signallaufzeit auswerten. Altimeter liefern wichtige Daten zur Erzeugung globaler Karten der Verformung des

Meeresspiegels, die etwa durch Schwankungen des Erdschwerefeldes oder Meeresströmungen verursacht werden.

Scatterometer: aktive Beleuchtung der Meeresoberfläche in Schrägsicht. Wellen beeinflussen die Intensität des zurückgestreuten Signals, was Rückschlüsse auf die Windverhältnisse ermöglicht.

Bildgebende Verfahren: Die größte Bedeutung in der Fernerkundung haben die Verfahren zur bildgebenden Erfassung der Landoberflächen der Erde erlangt, auf die im Folgenden eingegangen werden soll. Im Gegensatz zu optischen Sensoren, die eher chemische Objektmerkmale erfassen (meist den reflektierten Anteil des einfallenden Sonnenlichts) messen Radarsensoren eher physikalische Größen. Neben der Objektgeometrie bestimmen vor allem die Leitfähigkeit des Materials, die häufig vom Wassergehalt bestimmt ist, sowie die Oberflächenrauigkeit das gemessene Signal.

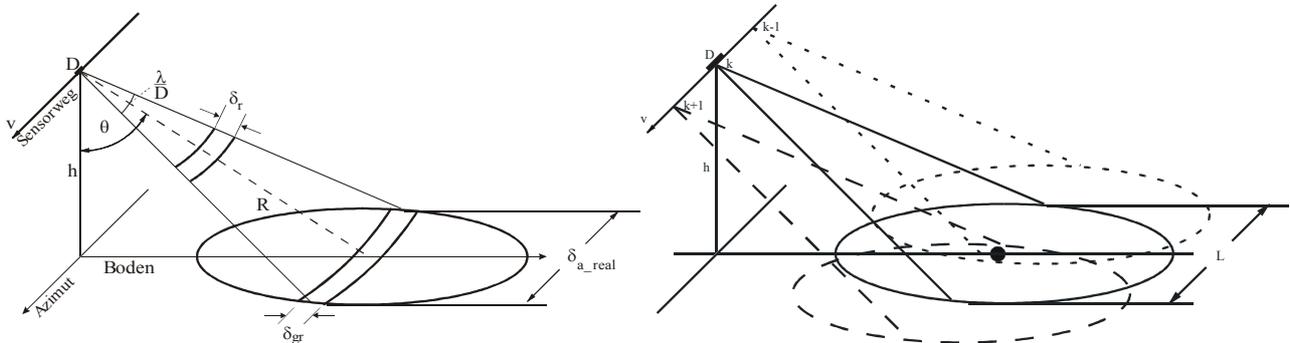
2. RADAR MIT SYNTHETISCHER APERTUR

Aufgrund von Beugung ist die Winkelauflösung eines Sensorsystems $\Delta\theta$ näherungsweise durch das Verhältnis von Signalwellenlänge λ zur Austrittsöffnung D des Sensors (optisch: Linsendurchmesser, Radar: Antennengröße) gegeben. Die um einige Größenordnungen längere Wellenlänge im Mikrowellenbereich führt daher prinzipiell zu einer deutlich schlechteren Winkelauflösung verglichen mit einem optischen Sensor, bei gleicher Öffnung D und Abstand R zur Szene (Gleichung 1). Dennoch ist mit speziellen Techniken eine bildhafte Erfassung der Erdoberfläche durch Radar mit hoher geometrischer Auflösung möglich. Damit trotz der geringen Winkelauflösung Objekte unterschiedlicher Entfernung unterscheidbar sind, erfolgt die Beleuchtung in Schrägsicht (Fig. 2a) und die Objekttrennung anhand der Laufzeit des abgetasteten zurückreflektierten Signals. Das Auflösungsvermögen in Entfernungsrichtung δ_r ist durch die Pulsdauer τ gegeben (Gl. 2, c = Lichtgeschwindigkeit). Diese Pulsdauer ist näherungsweise indirekt proportional zur Signalbandbreite B . Die Auflösung δ_r kann somit durch Erhöhung der Bandbreite verbessert werden und ist prinzipiell unabhängig vom Abstand R zwischen Sensor und Szene. Daher sind solche Messungen auch aus großer Entfernung möglich (z.B. Satellit Envisat).

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D} \cdot R \quad (1)$$

$$\delta_r = \frac{c \cdot \tau}{2} \approx \frac{c}{2 \cdot B} \quad \text{mit } \tau \cdot B \approx 1 \quad (2)$$

$$\delta_a \approx \frac{D}{2} \quad (3)$$



a) Radar mit realer Apertur

b) Wiederholte Erfassung entlang Flugweg

Figure 2: Radar mit realer Apertur (RAR) und Mehrfacherfassung für SAR-Auswertung

Die andere Koordinate des Bildes (parallel zum Flugweg) nennt man Azimut. Beim Standardradar entspricht die Azimutauflösung dem beugungsbegrenzten Fall und somit der Breite des Antennenabdrucks auf dem Boden. Eine hohe Auflösung in Azimutrichtung wird durch Zusammenfassung vieler Einzelmessungen (Fig. 2b) zu einer synthetischen langen Antenne erreicht (*Synthetic Aperture Radar*, SAR). Dadurch können Objekte bis zur Größe der halben Antennenausdehnung in Azimut getrennt werden (Gl. 3). Die SAR-Prozessierung fußt auf der Dopplerverschiebung des Sendesignals, die durch die Relativbewegung zwischen Sensor und Objekt entsteht. Hierfür ist es allerdings erforderlich, dass die Beleuchtung der Szene quer zur Flugrichtung erfolgt und neben der Amplitude auch die Signalphase gemessen wird.

Insbesondere SAR-Satellitensysteme sind in der Lage, in kurzer Zeit große Flächen zu erfassen. Die klassische Nutzung solcher SAR-Bilder liegt in der Kartierung des Geländes. Im Allgemeinen können Siedlungsbereiche, Wälder, Grasflächen, landwirtschaftliche Nutzflächen und Wasserflächen gut voneinander getrennt werden. Das IPI hat umfangreiche Erfahrung im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Untersuchung von SAR-Daten unterschiedlichen Typs. So bewerteten Lohmann et al., 2004, die Eignung von SAR-Bildern zur Erkennung linienhafter Objekte (z.B. Strassen) zu Kartierungszwecken im Vergleich mit optischen Bildern.

Die prinzipbedingte SAR-Schrägsicht hat bei bewegtem Gelände und in Städten nachteilige Auswirkungen. In Fig. 3 ist die Problematik schematisch dargestellt. Vereinfacht kann man SAR als Entfernungsmessung mit hoher Auflösung in Entfernung- und Azimutrichtung aber geringer Auflösung in Elevation (Kreise konstanter Entfernung mit variiertem Beleuchtungswinkel θ) auffassen. Zum Sensor geneigte Flächen werden daher verkürzt abgebildet (*Foreshortening*). Im Extremfall kommt es zu Umklappeffekten, die zu vertauschter Reihenfolge und unerwünschter Signalüberlagerung führen (*Layover*). Der Layover-Effekt ist besonders im Hochgebirge sowie in Städten (vertikale Gebäudewände) von Bedeutung. Hinter erhabenen Objekten werden Flächen verdeckt, dort ist das SAR-Bild schwarz und beinhaltet nur Rauschen.

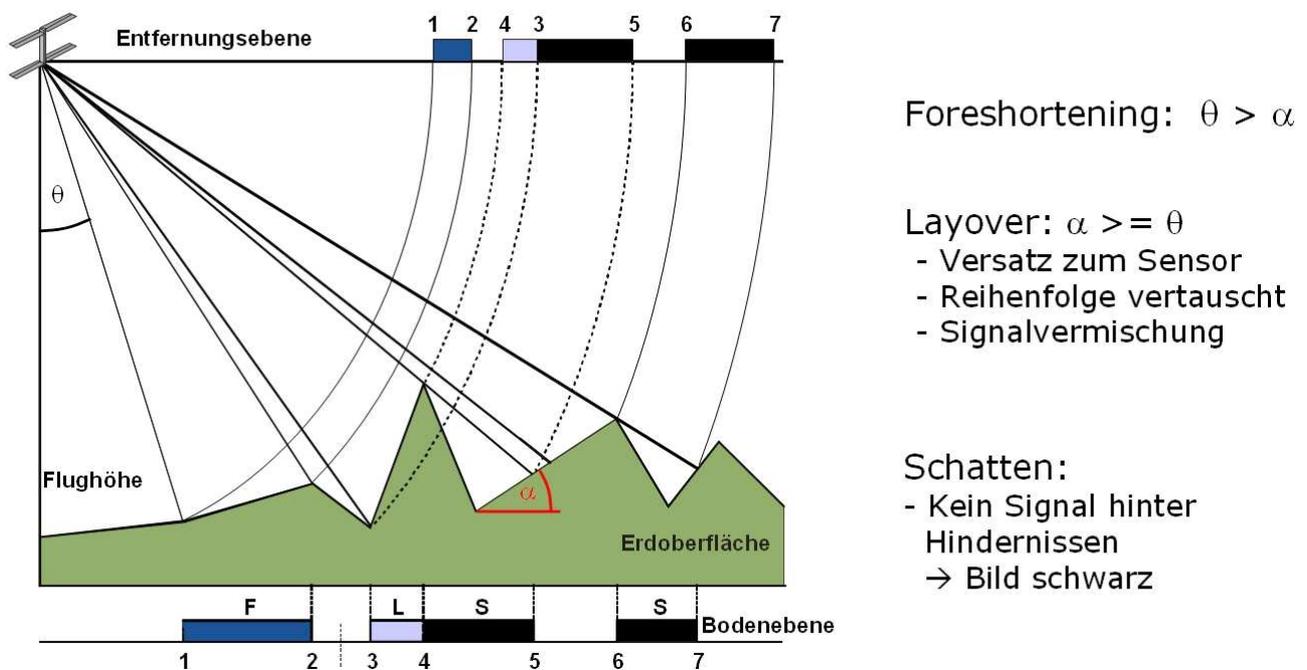
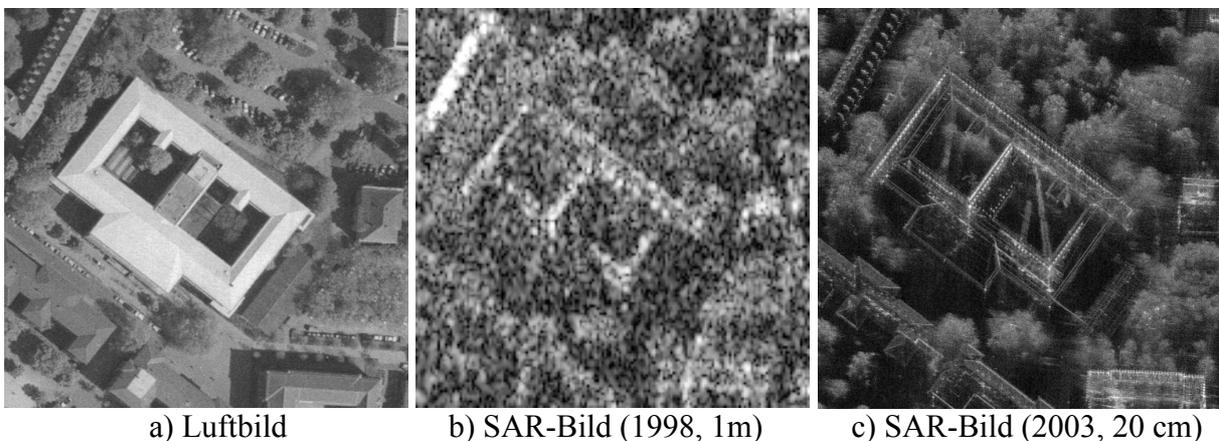


Figure 3: Auswirkung der Schrägsicht auf die SAR-Abbildung

3. ERFASSUNG VON SIEDLUNGEN MIT SAR

Wegen den genannten ungünstigen Auswirkungen der erforderlichen Schrägsicht bietet sich SAR weniger für die Routineerfassung von Städten an. Zum Zwecke der Kartenfortführung etwa, eignen sich sicherlich solche Sensoren besser, die die Szene in Nadirsicht erfassen, wie es bei Luftbildern oder LIDAR der Fall ist. Die Tatsache, dass dennoch die Beobachtung städtischer Strukturen mit Radar an Bedeutung gewinnt liegt unter anderem an folgenden Punkten:

- SAR ist unabhängig von der Tageszeit (aktiver Sensor) und vom Wetter (Wellenlänge)
 - Bei zeitkritischen Ereignissen (Naturkatastrophen, politischen Krisen) kann SAR daher das Mittel der Wahl sein, um aktuelle Daten zu gewinnen, nämlich gerade dann, wenn andere Sensoren nicht tauglich sind. zum Beispiel wegen Regen, Nebel oder Rauch.
 - Die Erfassung interessierender Szenen zu vorgegebenen Zeitpunkten oder mit regelmäßigen zeitlichen Abständen kann sichergestellt werden, was etwa zur Überwachung von langsamen Bodendeformationen vorteilhaft ist.
- Der technische Fortschritt hat zu einer signifikanten Verbesserung der geometrischen Auflösung von SAR-Sensoren geführt, in etwa um eine Größenordnung in der letzten Dekade. Erzielten ERS-1/2 oder auch Envisat eine Auflösung auf dem Boden von circa 25 m, so erreichen moderne Satelliten im feinsten Modus 1-2 m (z.B. TerraSAR-X, Deutschland, geplanter Start: Herbst 2006). Moderne Flugzeugsensoren stoßen in den Dezimeterbereich vor. In solchen Bildern wird nunmehr eine mit Radar bislang unerreichbare Detailfülle sichtbar [Soergel et al., 2006b]. Ein Beispiel für die neue Qualität der Abbildung von Gebäuden zeigt Fig. 4. Erste Untersuchungen hinsichtlich des Potentials zur Objekterkennung sind vielversprechend [Michaelsen et al., 2006].
- Waren bislang nur wenige Sensoren verfügbar, so wurden und werden zur Zeit eine Reihe von Satellitensystemen in die Umlaufbahn gebracht. Anfang 2006 startete der japanische L-Band-Sensor Daichi. Schon jetzt ist klar, dass der bereits genannte TerraSAR-X im Jahr 2009 durch TanDEM-X ergänzt werden soll. Der kanadische Radarsat 2 soll in Kürze folgen. Auch im militärischen Bereich gibt es entsprechende Anstrengungen: Deutschland und Italien werden in Kürze über jeweils einen Schwarm hoch auflösender SAR-Satellitensensoren verfügen (SAR-Lupe bzw. CosmoSkymed). Die Zunahme an Sensoren wird sich mit Sicherheit günstig auf die Verfügbarkeit von SAR-Daten auswirken und die Reaktionszeit verringern bis von einem gegebenen Ort Bilder erfasst werden können.



a) Luftbild

b) SAR-Bild (1998, 1m)

c) SAR-Bild (2003, 20 cm)

Figure 4: Fortschritt bei der geometrischen Auflösung, SAR-Bilder: FGAN (b) Sensor AER-II, c) Sensor PAMIR, beides Experimentalsensoren, die von Flugzeugen getragen werden)

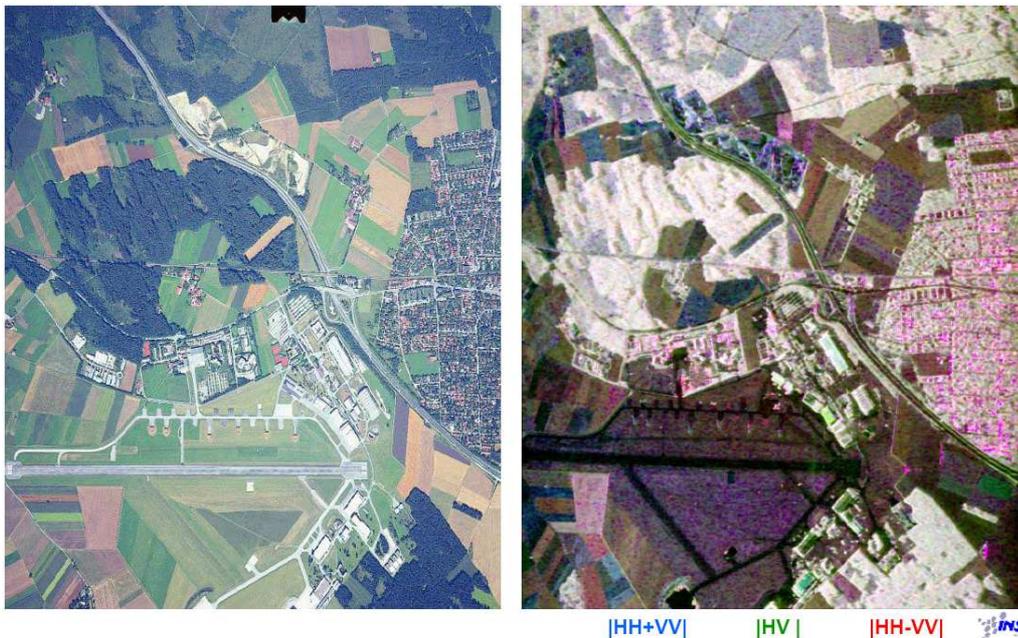
Die negativen Effekte durch Layover und Verdeckung lassen sich häufig durch eine mehrfache Beleuchtung aus verschiedenen Richtungen kompensieren. Eine Kombination nur weniger, mit bedacht geplanter SAR-Messungen kann beispielsweise genügen, um den Großteil der Dachflächen einer typischen europäischen Großstadt zu erfassen [Soergel et al., 2005]. Eng bebaute Bereiche mit Hochhauskomplexen hingegen bleiben auch bei einer Multiaspektauswertung problematisch.

Ein weiteres vielversprechendes Arbeitsfeld mit großem Forschungsbedarf ist die Stützung der Auswertung einzelner SAR-Bilder durch komplementäre Informationsquellen, seien es GIS-Daten oder Fernerkundungsbilder anderer Spektralbereiche. Die genannten Themen, Analyse von Multiaspekt-Bildern und Fusion mit anderen Daten, sollen einen Schwerpunkt der künftigen Arbeiten am IPI bilden.

Des Weiteren bietet SAR die Möglichkeit zur Auswertung der Phase sowie der Polarisation des Signals. Erstere kann genutzt werden, um durch Interferometrie Höhenmodelle zu gewinnen und die Auswertung der Signalpolarisation erlaubt Rückschlüsse auf die Natur der zugrunde liegenden Streuprozesse und damit auf diverse Oberflächeneigenschaften. Einige der genannten Aspekte werden im Weiteren eingehender behandelt.

4. SAR-POLARIMETRIE

Unter der Polarisation einer elektromagnetischen Welle versteht man die Ebene, in der der Vektor der elektrischen Feldstärke schwingt. Reflexionen an Grenzflächen können zu einer Richtungsänderung führen. Dies macht man sich bei der Radarfernerkundung zunutze, wobei üblicherweise horizontal oder vertikal polarisierte Wellen betrachtet werden. Während in der Vergangenheit aus technischen Gründen häufig nur eine Polarisation verwendet wurde (z.B. ERS), arbeiten moderne Systeme meist mit zwei Polarisationen (Envisat) oder sogar vollpolarimetrisch (Daichi, Japan, 2006). Bei monostatischem Radar (Sender und Empfänger sind identisch) müssen für einen vollständig polarisierten Datensatz 3 Bilder praktisch gleichzeitig erfasst werden: die beiden Co-Komponenten HH und VV und eine der beiden Kreuzkomponenten HV oder VH (erster Index: Empfangs-, zweiter: Sendepolarisation).



a) Luftbild

b) Polarimetrische SAR-Daten

Figure 5: Beispiel für die Erfassung mit polarimetrischen SAR-Daten (Quelle: DLR), Flughafen Oberpfaffenhofen

Man kann die Streumatrix zerlegen und daraus Aussagen ableiten entweder hinsichtlich diskreter Einzelziele oder, was in der Fernerkundung die Regel ist, anhand statistischer Analyse, über Flächenziele, wie etwa Äcker oder Wälder. In Fig. 5 rechts ist ein polarimetrischer SAR-Datensatz in der Pauli-Zerlegung in RGB-Darstellung zu sehen. Die Hauptanwendung polarimetrischer SAR-Daten ist die Klassifikation der Bodenbedeckung. Das IPI führt in diesem Feld wissenschaftliche Untersuchungen durch, beispielsweise zur Erkennung von Ackerpflanzen anhand Zeitreihen polarimetrischer SAR-Bilder des europäischen Satelliten Envisat [Tavakkoli & Lohmann, 2006].

5. SAR-INTERFEROMETRIE (INSAR)

Die SAR-Interferometrie fußt auf einer Auswertung der Signalphase meist zweier SAR-Bilder. Große Bedeutung hat die sogenannte InSAR-Technik zur Erzeugung von Höhenmodellen aus zwei quer zur Flugrichtung versetzt aufgenommenen SAR-Bildern erlangt (Fig. 6a). Der Versatz führt zu einer Weglängendifferenz, die sich in einem Phasenunterschied zwischen den Bildern äußert. Als ein Teilschritt einer ganzen Verarbeitungskette ist im Allgemeinen eine Phasenfortsetzung zur Beseitigung von Mehrdeutigkeiten erforderlich (Fig. 6b,c). Danach hängt der relative Höhenunterschied benachbarter Bildelemente des Interferogramms näherungsweise linear von der Phasendifferenz ab. Abhängig von der verwendeten Wellenlänge erhält man in Vegetationsbereichen ein DGM (langwelliges Signal, z.B. P-Band: 70 cm) oder ein DOM (kurzwellig, z.B. X-Band: 3 cm).

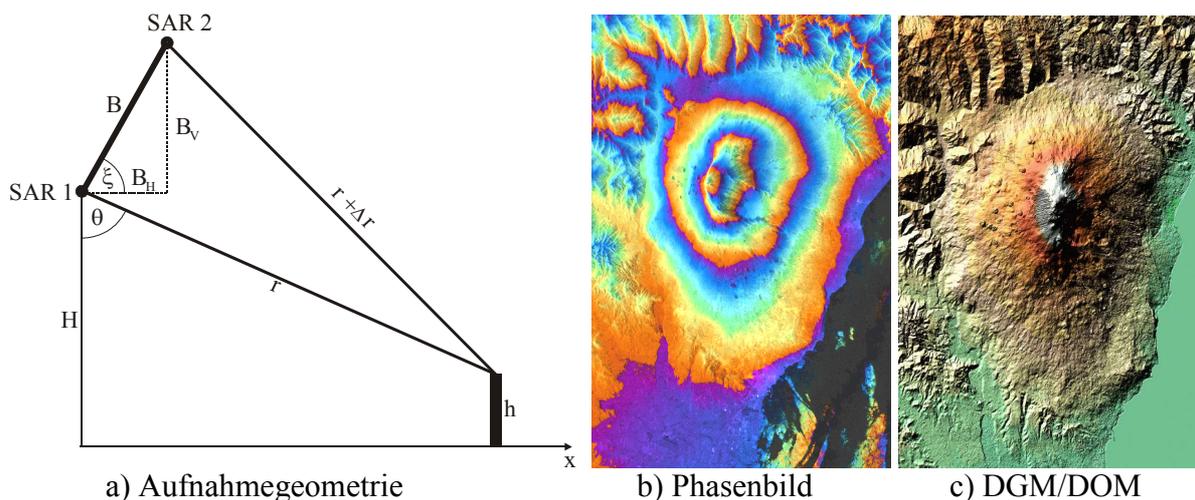


Figure 6: SAR-Interferometrie (b) und c) Daten der ERS-Tandemmission, Quelle: ESA)

Mittels der InSAR-Technik wurden von raumgestützten Sensoren praktisch bereits von der gesamten Landoberfläche der Erde solche Höhenmodelle unterschiedlicher Auflösung und Qualität erzeugt. Das IPI war unter anderem mit Genauigkeitsuntersuchungen von DOM der SRTM-Shuttlemission befasst, deren Maschenweite bei circa 30 m liegt. Für ein 50 x 50 km großes Testgebiet nördlich von Hannover ergab sich eine Standardabweichung der Höhenwerte von etwa 3 m [Koch et al., 2002].

In Zukunft ist eine Verbesserung der geometrischen Auflösung von DOM zu erwarten, die aus Satellitendaten erzeugt werden (TerraSAR-X, TanDEM-X). Das IPI wird auch hier Untersuchungen bezüglich deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit durchführen. Des Weiteren wird die Fragestellung untersucht, inwieweit aus solchen Daten sowie noch besser aufgelösten DOM luftgestützter Sensoren eine Objekterkennung, etwa von Gebäuden und Brücken [Soergel et al., 2006a], möglich ist.

6. DIFFERENTIELLE INTERFEROMETRIE

Bei der differentiellen Interferometrie (DInSAR) interessiert man sich für jenen Anteil der interferometrischen Differenzphase, der von der Bewegung der Erdoberfläche radial zum Sensor herrührt. Um den Topographieanteil der gemessenen Phase davon zu trennen, verwendet man entweder ein externes DGM, dann braucht man mindestens zwei SAR-Bilder (in der Regel Satellitendaten), oder man erzeugt ein InSAR-DGM hierzu, dann sind drei SAR-Bilder erforderlich [Crosetto et al., 2005]. Wenn man zur Analyse ganzer Bildstapel von Zeitreihenbildern übergeht, lassen sich atmosphärische Einflüsse auf die Phasenmessung kompensieren. Beim klassischen DInSAR erhält man flächenhaft Bewegungsdaten, solche Daten sind mittlerweile eine Standardquelle zur Überwachung von Vulkanen und Gletschern geworden. Weitere Einsatzgebiete sind Erdbeben und Bodenabsenkungen etwa aufgrund Grundwasserentnahme oder Bergbautätigkeit. In Fig. 7 ist als Beispiel eine Auswertung von Absenkungen im Ruhrgebiet dargestellt [Spreckels, 2002], an der das IPI beteiligt war. In Vertikalrichtung entspricht ein Phasenzyklus für ERS-Daten etwa 2,8 cm Bodenbewegung zwischen den beiden Aufnahmen. Man sieht in der Abbildung, dass bis zu 6 cm Bewegung in der Fläche korrekt rekonstruiert werden konnten, danach traten Abweichungen aufgrund von nicht richtig aufgelösten Mehrdeutigkeiten auf.

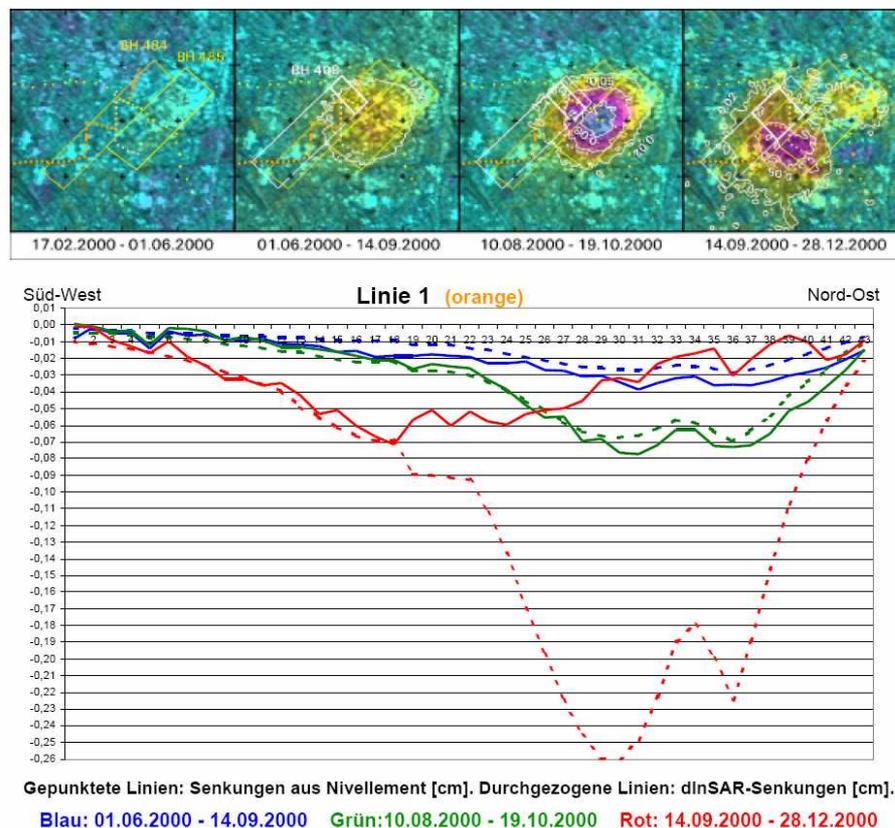


Figure 7: Absenkung aufgrund Bergbaus im Ruhrgebiet [Spreckels, 2002], Ab 6 cm Absenkung Fehler aufgrund von Mehrdeutigkeit

Eine alternative Methode zum klassischen DInSAR stellt die sogenannte „Point Scatterer“-Methode (PS, auch: „Permanent Scatterer“) dar [Ferretti et al., 2002]. Dabei werden nur besonders stabile Streuobjekte betrachtet, wie sie etwa an Gebäuden auftreten, die immer wieder in den Bildern identifiziert werden können. Man umgeht somit das Problem der zeitlichen Dekorrelation aufgrund von Vegetationseinflüssen, allerdings erhält man nur eine entsprechend ausgedünnte Matrix von

Messwerten. Diese Methode eignet sich vor allem für städtische Gebiete, wo in der Regel solche zeitstabilen Punktstreukörper in hoher Dichte auftreten.

Die Auswertung von Zeitreihen von SAR-Bildern mit Methoden der differentiellen Interferometrie soll in Zukunft einen Schwerpunkt der Radaraktivitäten am IPI bilden.

7. LITERATUR

Crosetto M, Crippa B, Biescas E, Monserrat O, Agudo M, Fernandez P: Land Deformation Monitoring Using SAR Interferometry", PFG, No. 6, 2005, pp. 497-510.

Ferretti A, Prati C, Rocca F: Permanent scatterers in SAR interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 39, No. 1, 2001, pp. 8-20.

Koch A, Heipke C, Lohmann P: Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen – Methodik und Ergebnisse", PFG 6/2002, pp. 389-398

Lohmann P, Jacobsen K, Pakzad K, Koch A: "Comparative Information Extraction from SAR and optical Imagery", IntArchPhRS. Vol. XXXV, Part B3. Istanbul, 2004, pp. 535-540.

Michaelsen E, Soergel U, Thoennesen U : "Perceptual Grouping for Automatic Detection of Man-Made Structures in high-resolution SAR Data". Pattern Recognition Letters, Elsevier B.V., Special Issue Pattern Recognition in Remote Sensing, Vol. 27, No. 4, 2006, pp. 218-225.

Soergel U, Gross H, Thiele A, Thoennesen U: Extraction of bridges over water in high-resolution InSAR data. Photogrammetrische Computer Vision, IntArchPhRS, 2006a in Druck.

Soergel U, Thoennesen U, Brenner A, Stilla U: "High resolution SAR data: new opportunities and challenges for the analysis of urban areas". IEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation, Vol. 153, No. 3, 2006b, pp. 294-300.

Soergel U, Schulz K, Thoennesen U, Stilla U: "Integration of 3D Data in SAR Mission Planning and Image Interpretation in Urban Areas". Information Fusion, Elsevier B.V., Vol. 6, No. 4, 2005, pp. 301-310.

Spreckels V (2002), "Untersuchung operationeller Aufnahmesysteme zur großflächigen Erfassung von Digitalen Geländemodellen und topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG)", Publikationen der DGPF, Band 11, pp. 67-82.

Tavakkoli Sabour S.M, Lohmann P: Multi-temporal Classification of ASAR Images in agricultural Areas, IntArchPhRS. Vol. XXXVII, Part B7. Enschede, 2006, 7 S., CD.