

# Zum Einsatz der Radarinterferometrie in der Ingenieurgeodäsie

## On the Application of Radar Interferometry in Engineering Geodesy

Björn Riedel | Jens-André Paffenholz

### Zusammenfassung

Im Rahmen von großräumigen geometrischen Fragestellungen ist die satellitenbasierte Radarfernerkundung zu einem Standardverfahren geworden und wird mittlerweile im Bereich der Erfassung von Bodenbewegungen auf Bundes- bzw. Länderebene genutzt.

Wesentlich kleinräumigere Untersuchungsgebiete wie Hangrutschungen, Böschungsbewegungen, Setzungen von Bauwerken oder Deformationsmessungen im Bereich des Tunnelbaus, der Dammüberwachung oder der Stabilitätsuntersuchungen von Brücken fallen in den Bereich der Ingenieurgeodäsie und können teilweise auch mit radarinterferometrischen Verfahren beobachtet und überwacht werden.

In diesem Beitrag soll auf die grundlegenden Messmethoden der satellitengestützten und terrestrischen Radarinterferometrie für die Anwendung in der Ingenieurgeodäsie eingegangen und das Anwendungspotenzial für Fragestellungen in der Ingenieurgeodäsie an einigen Beispielen dargestellt werden.

**Schlüsselwörter:** Ingenieurgeodäsie, Radarinterferometrie, Terrestrische Radarinterferometrie, PS Interferometrie, SBAS Interferometrie

### Summary

*In the context of large-scale issues, satellite-based radar remote sensing has become a standard procedure and is used in the field of observing ground movements at national and federal level. Much smaller-scale investigation areas such as landslides, slope movements, settlements of structures or deformation measurements in the field of tunnel construction, dam monitoring or stability investigations of bridges fall into the field of engineering geodesy and can partly also be observed and monitored with radar interferometric methods.*

*In this paper, the basic measurement methods of satellite and terrestrial-based radar interferometry for application in engineering geodesy will be discussed and the application potential for questions in engineering geodesy will be illustrated with some examples.*

**Keywords:** engineering geodesy, radar interferometry, terrestrial radar interferometry, PS interferometry, SBAS Interferometry

### 1 Einleitung

Generell sind die Anwendungsmöglichkeiten der Radarinterferometrie sehr vielfältig und umspannen Fragestellungen von der Geodynamik, über Einsatzmöglichkeiten in der Landesvermessung bis hin zu kleinräumigeren Aufgaben in der Ingenieurgeodäsie. Im Rahmen von großräumigen Fragestellungen ist die satellitenbasierte Radarfernerkundung zu einem Standardverfahren geworden und wird im Bereich der Erfassung von Bodenbewegungen auf Bundes- bzw. Länderebene genutzt (Lege et al. 2019, Gefeller et al. 2020). Seit Herbst 2022 stehen auf europäischer Ebene im Rahmen des Copernicus-Programmes der EU die Bewegungsdaten des European Ground Motion Service öffentlich zur Verfügung. Gerasterte Ergebnisse aus dem deutschen bzw. europäischen Bodenbewegungsdienst können über einen Webbrowser abgefragt werden (<https://bodenbewegungsdienst.bgr.de>, <https://egms.land.copernicus.eu/>). Über die Anwendungen der satellitengestützten Radarinterferometrie auf regionaler und lokaler Ebene berichten u. a. Kalia et al. (2021), Brockmeyer et al. (2020), Riecken et al. (2019) und Esch et al. (2019). Kleinräumigere Untersuchungsgebiete, die in den Aufgabenbereich der Ingenieurgeodäsie fallen, wie Hangrutschungen, Böschungsbewegungen, Setzungen von Bauwerken oder Deformationsmessungen im Bereich des Tunnelbaus, der Dammüberwachung oder der Stabilitätsuntersuchungen bei Brücken, können teilweise auch mit radarinterferometrischen Verfahren beobachtet und überwacht werden. Die Nutzung von terrestrischen Radarsystemen hat in der Ingenieurgeodäsie bisher noch keine signifikante Bedeutung erlangt und bildet eher die Ausnahme, ist aber ein Verfahren, das kontinuierlich und flächenhaft geometrische Objektveränderungen erfassen kann (Paffenholz et al. 2018, Butt et al. 2020).

In der DIN 18710-1 wird von Ingenieurvermessung als der Vermessung im Zusammenhang mit der Aufnahme, Projektierung, Absteckung, Abnahme und Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten geschrieben. Allgemein versteht man in den Ingenieurwissenschaften unter Monitoring die Erfassung, Beobachtung oder Überwachung von natürlichen und künstlichen Systemen (DIN 18710-4 2010).

Kuhlmann et al. (2013) definieren in ihrem Beitrag den Begriff der Ingenieurgeodäsie als »die Disziplin von der Aufnahme, der Absteckung und dem Monitoring lokaler

und regionaler geometriebezogener Phänomene mit besonderer Berücksichtigung von Qualität, Sensorik und Bezugssystemen.«

Beiden Begriffsbeschreibungen der Ingenieurgeodäsie ist der Begriff des Monitorings gemeinsam, der das Erfassen und Beobachten bzw. die Überwachung von Objekten zum Inhalt hat. Hierin ist die Erfassung von dreidimensionaler Geometrie und ihrer Veränderungen unter Berücksichtigung der Zeitkomponente zu sehen. Die Größe des Untersuchungsobjektes verändert sich vom kleinräumigen Objekt zu regionaler Größe bzw. vom isolierten Objekt zum Untersuchungsobjekt und seiner in den Prozess einbeziehenden Umgebung hin.

In diesem Beitrag soll auf die grundlegenden Messmethoden der satellitengestützten und terrestrischen Radarinterferometrie für die Anwendung in der Ingenieurgeodäsie eingegangen werden und das Anwendungspotenzial für Fragestellungen in der Ingenieurgeodäsie an einigen Beispielen dargestellt werden.

## 2 Einblick in die Radarinterferometrie

Aus dem elektrotechnischen Messprinzip des Radarsystems und dem optischen Grundprinzip der Interferometrie hat sich mit Beginn der 1990er Jahre intensiv das Forschungs- und Anwendungsfeld der Radarinterferometrie herausgebildet. So ist unter dem Begriff Radar zunächst die Sensortechnik und unter dem Begriff der Interferometrie die eigentliche Messmethode zu verstehen.

Das Akronym Radar steht für »Radio Detection and Ranging« und bezeichnet ein Verfahren, das aktiv ausgestrahlte und reflektierte elektromagnetische Wellen zur Informationsgewinnung von entfernten Objekten nutzt

Tab. 1: Radarbänder bzw. -frequenzbereiche und ihre Wellenlängen sowie die gängigen Sensorplattformen

Frequenzband	Frequenz [GHz]	Wellenlänge [cm]	Sensorplattform
P-Band	0,2–1	60–30	Flugzeug
L-Band	1–2	30–15	Flugzeug/ Satellit
S-Band	2–4	15–7,5	Terrestrisches Radarsystem/ Satellit
C-Band	4–8	7,5–3,7	Terrestrisches Radarsystem/ Flugzeug
X-Band	8–12,5	3,7–2,4	Terrestrisches Radarsystem/ Satellit
Ku-Band	12,5–18	2,4–1,7	Terrestrisches Radarsystem/ Satellit

und dessen technische Ursprünge bis in die 30er Jahre des letzten Jahrhunderts zurückreichen (Klausing und Holpp 2014). Damit ist dieses Verfahren den Messmethoden der aktiven Fernerkundung zuzuordnen.

Die Grundlage jeder interferometrischen Auswertung ist die kohärente Phasenbeziehung zwischen zwei elektromagnetischen Wellen. Die Kohärenz beschreibt einen definierten Phasenzusammenhang zwischen den Signalen und bildet damit die Grundlage für die Interferenz, die Überlagerung dieser zwei Wellen. Ein sehr bekanntes Beispiel für die Überlagerung zweier kohärenter Lichtsignale, gleicher Frequenz und Phase, ist das Michelson-Interferometer. Hier wird das Ursprungssignal durch einen Strahlteiler in zwei Strahlen gleicher Intensität aufgeteilt und die Lichtsignale werden über unterschiedlich lange Wege wieder zusammengeführt (Hering und Martin 2017). Bei diesem Vorgang der Überlagerung der beiden Wellen kommt es aufgrund des unterschiedlichen langen Weges zu einem Signalmuster, das von Hell zu Dunkel (Verstärkung bzw. Auslöschung) in Abhängigkeit der Weglänge variiert (Joeckel et al. 2008). Die Wiederholung dieses Hell-Dunkel-Musters hängt von der Weglänge des verschobenen Strahles ab und ist proportional zur halben Wellenlänge.

Dies bedeutet, dass das in der Radarinterferometrie genutzte Signal kohärent sein muss und die elektromagnetischen Charakteristika, wie Amplitude, Frequenz, Phasenlage, Polarisation und Laufzeit bekannt sein müssen.

Diese Signalparameter sind in der Geodäsie wohlbekannte Messgrößen (terrestrische Entfernungsmessung oder GNSS-Beobachtungen) und geben im Gegensatz zur passiven Fernerkundung, die die rückgestreute Energie betrachtet, die Möglichkeit, geometrische Veränderungen abzuleiten, wenn zwei kohärente Beobachtungen der Phasenlage  $\varphi$  zu unterschiedlichen Zeitpunkten ( $t_i, t_{i+1}$ ) durchgeführt werden. Diese Phasenlagenveränderung  $\Delta\varphi$  resultiert aus geometrischen Veränderungen in der Auflösungszelle am Objekt. Die Bestimmung der Phasenlagenänderung ist somit die eigentliche Messgröße in der Radarinterferometrie und ordnet dieses Messverfahren den relativen Messverfahren zu.

Die genutzten Frequenzen in der Radartechnik finden sich in Tab. 1 und liegen im Frequenzbereich der Mikrowellen, was den Vorteil hat, dass das Verfahren generell wetterunabhängig ist und auch Wolken durchdringen kann. Die Nutzung dieses aktiven Messsystems bietet natürlich auch den Vorteil der Informationsgewinnung bei Nacht im Vergleich zu multispektralen Fernerkundungssystemen, die in der Regel die Datenaufzeichnung bei Tageslicht über dem Untersuchungsgebiet durchführen.

Neben der geometrisch interessierenden Phaseninformation steht auch die Intensitätsinformation zur Verfügung, die als Graustufenbild im linken Teil der Abb. 1 für einen Innenstadtbereich zu sehen ist. Die dazugehörige Phaseninformation ist im rechten Teil der Abb. 1 zwar visualisiert, aber nicht direkt interpretierbar.

Die räumliche Auflösung des Signals am Objekt hängt grundsätzlich von der Impulsauflösung in Senderichtung

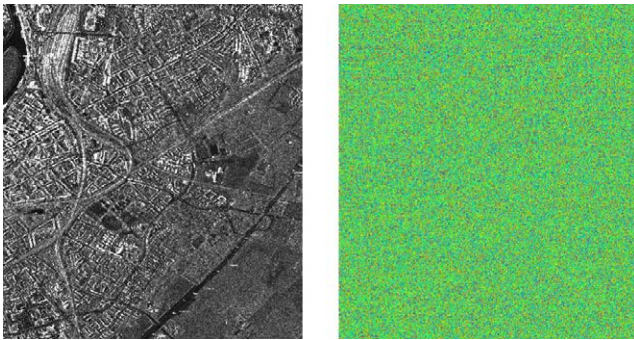


Abb. 1: Intensitätsbild (links) und korrespondierende Phaseninformation (rechts), aufgenommen im X-Band vom Satelliten TerraSAR-X über der Stadt Düsseldorf (TSX 2011)

(range) und der eingesetzten Antennentechnik senkrecht (azimuth) hierzu ab. Man unterscheidet hier Systeme mit realer Antennenfläche (aperture) von Systemen mit synthetischer Apertur.

Bewegt oder deformiert sich die Objektoberfläche, so ergibt sich bei wiederholter Erfassung mit einem Radarsystem die Phasenlagendifferenz  $\Delta\varphi$ . Durch die aktive Entfernungsmessung legt das ausgesandte und reflektierte Radarsignal den doppelten Abstand zwischen Sensor und Objekt zurück. In Abb. 2 ist eine Phasenlagendifferenz  $\Delta\varphi$  dargestellt, die letztendlich in das metrische System umgerechnet werden kann.

$$\Delta\varphi = \varphi_{disp} + \varphi_{topo} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} + 2\pi \cdot n \quad (1)$$

Allerdings beinhaltet der abgeleitete Signalanteil  $\Delta\varphi$  neben dem gesuchten Deformationssignal  $\varphi_{disp}$  auch noch Störanteile aus der Topographie  $\varphi_{topo}$ , der Atmosphäre  $\varphi_{atm}$  und dem Systemrauschen  $\varphi_{noise}$ , sowie dem Mehrdeutigkeitsproblem, das durch  $2\pi \cdot n$  ausgedrückt wird und zum Tragen kommt, wenn zwischen den Zeitpunkten der Datenerfassung die Bewegungen größer als ein Viertel der Wellenlänge sind, s. a. Gleichung (1).

### 3 Satellitengestützte Radarinterferometrie

#### Aufnahmegeometrie

Bei den Radarsatelliten handelt es sich um kohärente Abbildungssysteme, die neben der Intensität auch die Phasenlage aufzeichnen, wie in Abb. 1 dargestellt. Die typischen Kenngrößen einer Satellitenmission sind hier exemplarisch anhand der europäischen Sentinel-1-Mission mit ihren Sentinel-1-Satelliten beschrieben: Der Satellitenorbit befindet sich auf einer niedrigen Umlaufbahn von knapp 700 km Höhe und die Umlaufzeit liegt bei 98 Minuten. Damit ist eine Wiederholrate von 12 Tagen für einen Satelliten gegeben. Durch die diametrale Anordnung der beiden Satelliten auf dem gleichen Orbit wird das Untersuchungsgebiet alle sechs Tage erfasst (ESA 2012).

Die Bodenauflösung liegt in Blickrichtung (range direction) des Sensors bei 5 m und senkrecht, in Flugrichtung,

bei 20 m (azimuth direction) und die Größe der erfassten Fläche liegt bei 200 km × 300 km. Der Aufnahmewinkel (incidence angle) liegt in Bezug auf die Nadir-Richtung zwischen 20 und 40 Grad. Während des Umlaufes des Satelliten um die Erde kommt es zu sogenannten auf- und absteigenden Bahnbögen (ascending und descending orbits), die das Untersuchungsgebiet bzw. -objekt aus zwei unterschiedlichen Blickrichtungen aufnehmen. Die Neigung der Bahnebene gegenüber der Äquatorebene und die Anordnung des Sensors rechtwinklig zum Orbit führen dazu, dass die Sensitivität für West-Ost-Veränderungen im Untersuchungsgebiet bzw. des Objektes deutlich höher ist als in Nord-Süd-Richtung.

In Tab. 2 sind aktuelle Satellitenmissionen mit ihren Bodenauflösungen und den dazugehörigen Wiederholzyklen dargestellt.

Durch die aktive Entfernungsmessung legt das ausgesandte und reflektierte Radarsignal den doppelten Abstand zwischen Sensor und Objekt zurück. In Abb. 2 ist das Grundprinzip der satellitengestützten Radarinterferometrie dargestellt. Die Sensitivität des Systems ist in Blickrichtung des Sensors (Line-of-Sight, LOS) gegeben. Während die Auflösung in Range-Richtung als relativ gut angesehen werden kann, ist jedoch die Auflösung in Azimut-Richtung limitiert durch die physikalische Länge der Antenne.

Um auch in dieser Richtung eine hohe Auflösung zu erzielen, wird die als Synthetic Aperture Radar (SAR) bezeichnete Aufnahme- und Auswertemethodik angewendet. Dabei wird die gewünschte Vergrößerung der Antennenlänge durch Kombination einer Reihe von Aufnahmen aus aufeinanderfolgenden Satellitenpositionen erreicht.

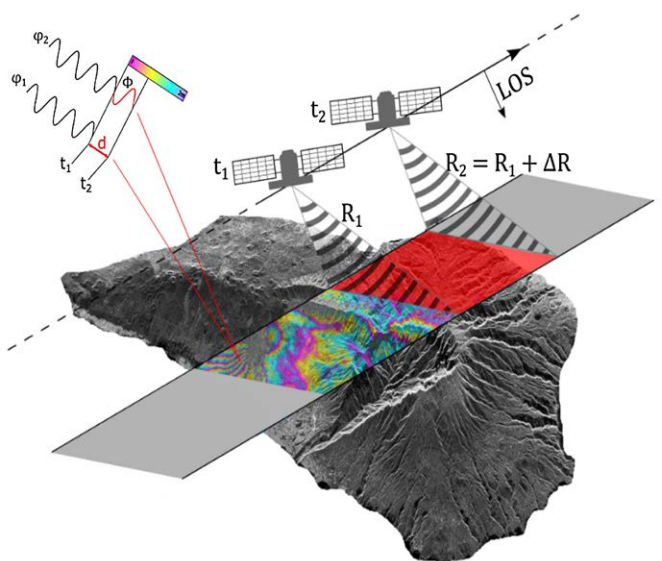


Abb. 2: Grundprinzip der satellitengestützten Radarinterferometrie mit der flächenhaften Erfassung des Untersuchungsobjektes entlang der Flugbahn. Die geometrische Veränderung  $d$  des Untersuchungsobjektes wird als Phasenlagenänderung zwischen den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  gemessen und farbcodiert im Bereich zwischen 0 und  $2\pi$  dargestellt.

Tab. 2: Aktuelle Satellitenmissionen und ausgewählte Kenngrößen (ESA 2023)

Satellitenmission	Wiederholrate in Tagen	Typische Auflösung in Blickrichtung [m]	Frequenzbereich
TerraSAR-X/Tandem-X	11	<1, 1-3, 16	X-Band
Sentinel-1	6	5, 20	C-Band
Cosmos-Skymed Constellation	1-16	1-3	X-Band
PAZ	11	<1, 1-3, 16	X-Band
Radarsat Constellation	1 bzw. 4	1, 3, 5, 16, 50, 100	X-Band
ALOS-2	14	3, 6, 10, 100	L-Band

Differentielle Interferometrie

Die gesuchte Größe ist die in (1) beschriebene Deformation am Objekt, die als Phasenlagendifferenz  $\Delta\varphi$  aus zwei Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgeleitet wird. Nach Bamler et al. (2008) gilt für den Objekttyp bzw. für das betrachtete Pixel im Zeitpunkt  $t_1$  für die Phasenlage  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} R + \varphi_{scatt,1} \tag{2}$$

Die Datenaufnahme zum Zeitpunkt  $t_2$  des Objektes erfolgt im Orbit an der Position zum Zeitpunkt  $t_2$ .

Sie liefert die Phasenbeziehung

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R + \Delta R) + \varphi_{scatt,2} \tag{3}$$

In den Gleichungen (2) und (3) steht der Term  $\varphi_{scatt}$  für den zufälligen Signalanteil des beobachteten Flächenelementes an der Erdoberfläche bzw. des Infrastrukturobjektes zum Zeitpunkt der Datenerfassung. Wobei  $\Delta R$  für die Range-Parallaxe steht und aus den Orbitpositionen der beiden Satellitenaufnahmen resultiert. Ist der Aufnahmeabstand (interferometrische Basislinie) ausreichend klein, spricht man von differentieller Interferometrie und man kann Objektbewegungen im cm-Bereich ableiten.

In der Differenzbildung der beiden Aufnahmen und unter der Annahme, dass der zufällige Anteil  $\varphi_{scatt}$  in beiden Aufnahmen gleich ist, erhält man im Schritt der Interferogrammgenerierung die gesuchte Phasendifferenz

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R \tag{4}$$

Wie in (1) dargestellt, sind in der Phasendifferenz noch verschiedene Störanteile enthalten, die im Rahmen der Berechnung des differentiellen Interferogramms (schematische Darstellung in Abb. 3) korrigiert werden.

Ausgehend von den zwei Radaraufnahmen, die als komplexwertiger Datensatz die Phasenlage und Intensität beinhalten, wird ggf. unter Berücksichtigung von präzisen Bahndaten (0) die Koregistrierung (1) der beiden Szenen im sub-pixel-Bereich durchgeführt. Die Interferogramm-erzeugung (2) läuft als komplexe Multiplikation ab, die als Ergebnis das Phasendifferenzbild beinhaltet. Nach Subtraktion der topografischen Phase (3) aus einem externen Höhenmodell erhält man als Ergebnis das differentielle

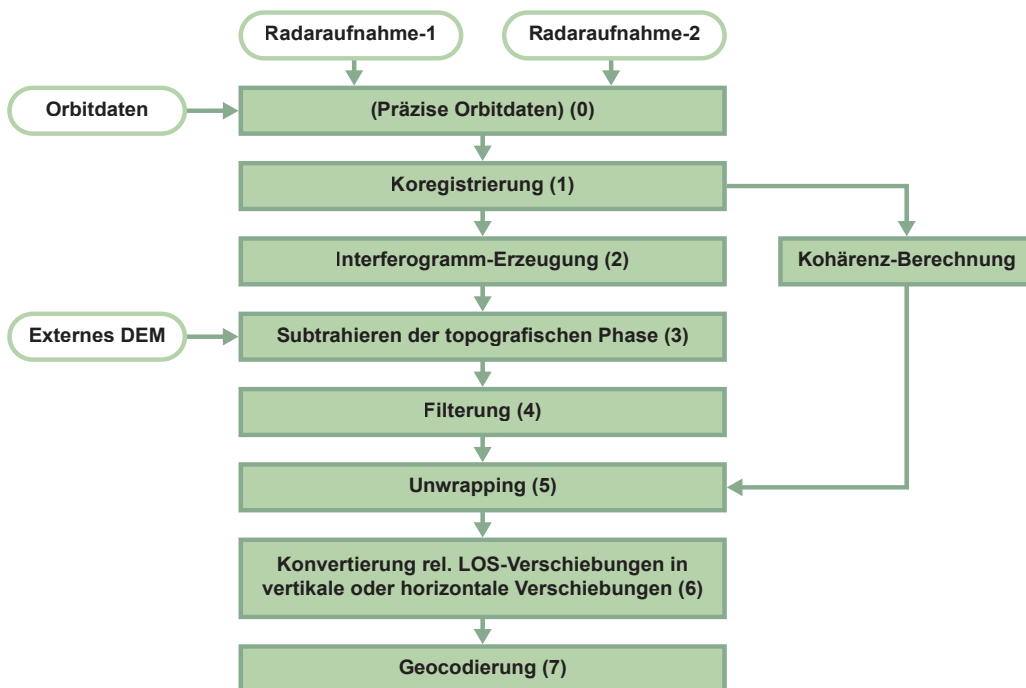


Abb. 3: Schematischer Prozessierungsablauf für ein differentielles Interferogramm zur Ableitung von Deformationen

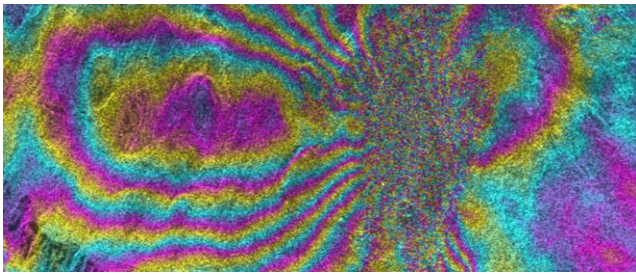


Abb. 4: Differentielles Interferogramm mit dem typischen Fringemuster, das die Phasenlagenänderung in einem Bereich von 0 bis  $2\pi$  bzw. einem Vielfachen darstellt.

Interferogramm mit dem typischen Fringemuster (siehe auch Abb. 4), das die Phasenlagenänderung in einem Bereich von 0 bis  $2\pi$  bzw. einem Vielfachen darstellt.

Nach der Filterung (4) und unter Berücksichtigung der Kohärenzberechnung folgt der Schritt des Unwrapping (5), bei dem aus den Phasenlagen bzw. Fringes eine geschlossene Lösung für das Untersuchungsgebiet erzeugt wird. Anschließend wird dieses ungewrappte LOS-Ergebnis in relative vertikale oder horizontale Bewegungen (6) in Abhängigkeit vom Aufnahmewinkel umgerechnet und ggf. noch in ein Abbildungssystem (7) transformiert.

Durch die Zusammenführung der interferometrischen Ergebnisse aus den Auswertungen der auf- und absteigenden Bahnbögen kann auch die dreidimensionale Objektbewegung beschrieben bzw. entsprechend abgebildet werden (Yin und Busch 2018, Isya 2020).

**Einflüsse auf die Auswertung**

Durch den schrägen Aufnahmewinkel kann es zu Verzerrungen in der Aufnahmegeometrie kommen, die in Zusammenhang mit der Gelände- bzw. Gebäudehöhe stehen (Walter 2011) und zur Folge haben, dass es zu geometrischen Verkürzungen der Topografie, zu Überlagerungen von Objektflächen und Abschattungen in der Erfassung des dreidimensionalen Untersuchungsobjektes kommt.

Auch der Einfluss der Atmosphäre  $\varphi_{atm}$  kann in einer interferometrischen Lösung als Pseudodeformation enthalten sein, wie auch Restfehler aus dem verwendeten Höhenmodell  $\varphi_{topo}$ . Ebenfalls hat die Wellenlänge einen Einfluss auf die Durchdringung der Vegetation, wie in Abb. 5 dargestellt.

Das X-Band wird aufgrund seiner kurzen Wellenlänge an der ersten Reflexionsmöglichkeit zurück zum Sensor

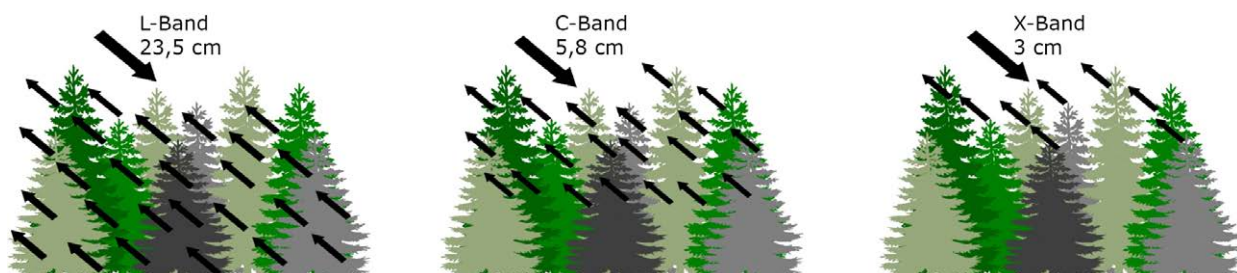


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung des Einflusses der Wellenlänge auf die Durchdringung der Vegetation und Rückreflexion der Signalanteile in Abhängigkeit der Eindringtiefe

reflektiert und eignet sich hervorragend für die Beobachtungen von Stadtlandschaften mit ihren Infrastrukturanlagen. Das etwas längere C-Band dringt noch durch kleine Büsche auf die Erdoberfläche durch, oder durch die ersten Blätterlagen eines Baumes, und wird dann erst reflektiert. Es ist als Kompromiss zwischen dem X-Band und dem deutlich längeren L-Band zu betrachten und eignet sich generell für Beobachtungen im urbanen und ländlichen Raum.

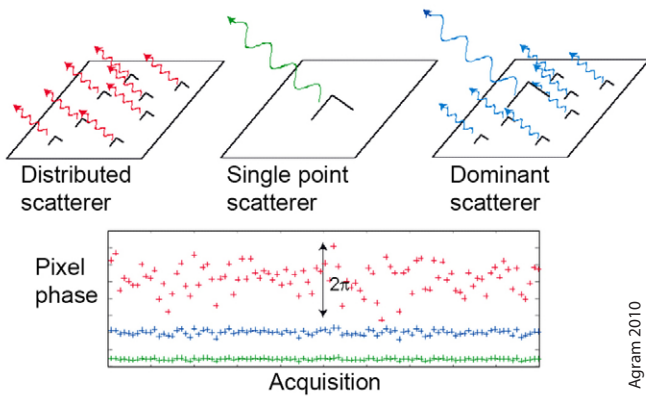
Damit hat die Wahl des Sensors natürlich auch einen Einfluss auf die interferometrische Auswertung, da die Wellenlänge in einem direkten Zusammenhang mit der Reflektivität am Objekt (Beton, Vegetation) bzw. auch der Eindringung in Oberflächen (Gras-/Sandboden, Schnee, ...) steht. Für ingenieurgeodätische Fragestellungen stellen somit X-Band-Sensoren, wie z. B. TerraSAR-/Tandem-X oder CosmoSkymed, die geeignete Wellenlänge zur Verfügung.

**4 Multitemporale Auswertansätze**

Die eigentliche Anwendung der Radarinterferometrie in der Ingenieurgeodäsie liegt in den multitemporalen Auswertansätzen, wie Persistent-Scatterer-Interferometrie oder Small-Baseline-Subset-Interferometrie und ihren verschiedenen Realisierungen. Hierbei werden eine große Anzahl (im Idealfall mehr als 50) von zeitlich aufeinanderfolgenden Radarsatellitenaufnahmen ausgewertet, da dann die atmosphärischen Störeinflüsse, Bahnfehler oder Höhenmodellunsicherheiten weitgehend modelliert bzw. eliminiert werden können (Osmanoğlu et al. 2016). Diese Verfahren setzen allerdings voraus, dass sich das Untersuchungsobjekt bzw. -gebiet während dieses längeren Beobachtungszeitraums nicht grundlegend in seinen geometrischen und radiometrischen Eigenschaften verändert, also weiterhin Kohärenz gegeben ist. Die grundsätzliche Auswertung zwischen den verschiedenen Datensätzen erfolgt immer auf Basis der Interferogrammberechnung.

In Abb. 6 sind exemplarisch drei Auflösungszellen an der Erdoberfläche bzw. an einem Geobjekt mit ihren Rückstreuereigenschaften dargestellt. Man erkennt, dass die Rückstreuereigenschaft der ganzen Auflösungszelle von der Verteilung der einzelnen Elementarstreuer abhängig ist. Dies hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die Phasenstabilität und damit auf die Qualität der abgeleiteten Zeitreihe. Für ingenieurgeodätische Anwendungen sind

Nach Jensen 2007



Agram 2010

Abb. 6: Schematische Darstellung der Rückstreuungseigenschaften von Auflösungszellen für verteilte Elementarstreuer (Distributed Scatterer), Einzelpunktstreuer und einen dominanten Streuer in Relation zu anderen Elementarstreuern in Pixel. Das Phasenbild der drei Flächenelemente über die Zeit ist mit der dazugehörigen Phasenstabilität den Streuern farblich zugeordnet.

natürlich sehr kleine Pixelgrößen von 0,5 m bis 2 m (z. B. bei TerraSAR-X) am Objekt von großem Interesse, da man dadurch eine hohe Diskretisierungsdichte des Untersuchungsobjektes erhält.

Da eine stabile Kohärenz nur selten für ein ganzes Untersuchungsgebiet (zumindest nicht für einen größeren Abschnitt der Erdoberfläche) vorhanden ist, haben Ferretti et al. (1999, 2001) erstmals die interferometrische Analyse allein auf sogenannte »Persistent Scatterer« (PS-InSAR) beschränkt, die auch als »Permanent Scatterer Interferometry« (PSI) bezeichnet wird. Etliche Beiträge befassten sich seither mit Verfeinerungen dieser Ansätze. Eine Übersicht findet sich in Crosetto et al. (2015).

Als Persistent Scatterer (PS) werden einzelne Pixel oder »Punktstreuer« bezeichnet, deren Rückstreuungseigenschaften über den Zeitraum der Untersuchung stabil sind. Eine weitere Voraussetzung ist – wie oben erwähnt – eine sub-pixel genaue Ko-Registrierung der Radaraufnahmen, d. h. eine hochpräzise geometrische Zuordnung der einzel-

nen Aufnahmen, da ansonsten keinerlei Punktidentitäten bzw. Aussagen über Punktbewegungen möglich sind. Die Grundlage dieses Auswertansatzes ist das einzelne Interferogramm zwischen einer Referenzszene in Relation zu allen weiteren Aufnahmen im Untersuchungszeitraum.

Für diese PS können dann Zeitreihen von Phasenlagen abgeleitet werden, also das Deformationsverhalten einzelner Pixel sehr präzise über die Zeit verfolgt werden. Es zeigt sich, dass im innerstädtischen Gebiet typischerweise viele PS (> 1000/km<sup>2</sup>) zu finden sind, während sich für ein offenes Gelände mit Ackerflächen, Wiesen, Brachland und Waldflächen kaum hinreichend viele PS (< 100/km<sup>2</sup>) finden lassen.

In Abb. 7 sind die räumlichen und zeitlichen Verbindungen zwischen den einzelnen Radaraufnahmen in Form eines Netzwerkes (connection graphs) dargestellt. Die PSI-Auswertung ist links dargestellt und bildet nur Interferogramme zwischen einer Referenzszene und allen anderen Aufnahmen der Zeitreihe.

Für Anwendungen im ländlich geprägten Raum wird generell das Verfahren der Small Baseline Subset (SBAS)-Interferometrie angewandt (Berardino 2002). Hierbei werden nach den Kriterien: (a) maximal zulässige Basislinienlänge und (b) zeitliche Überlappung im Beobachtungszeitraum alle sinnvollen Kombinationen von interferometrischen Beobachtungspaaren prozessiert und zeitabhängig im Sinne eine Zeitreihe ausgewertet, siehe Abb. 7 rechts. In diesem Beispiel werden für die SBAS-Auswertung verschiedene Referenzszenen in Bezug zu Nachbarszenen auf Basis einer maximalen zeitlichen Differenz von 60 Tagen und einer interferometrischen Basislinienlänge von weniger als 50 m gebildet.

Das Ziel der SBAS-Auswertung ist es, eine flächenhafte und zeitabhängige Aussage über das Bewegungsverhalten (Setzung oder Hebung) des Untersuchungsgebietes zu bekommen. Letztendlich erhält man hier ebenfalls Zeitreihen für die kohärenten Pixel, gemäß den gewählten Auswerteparametern.

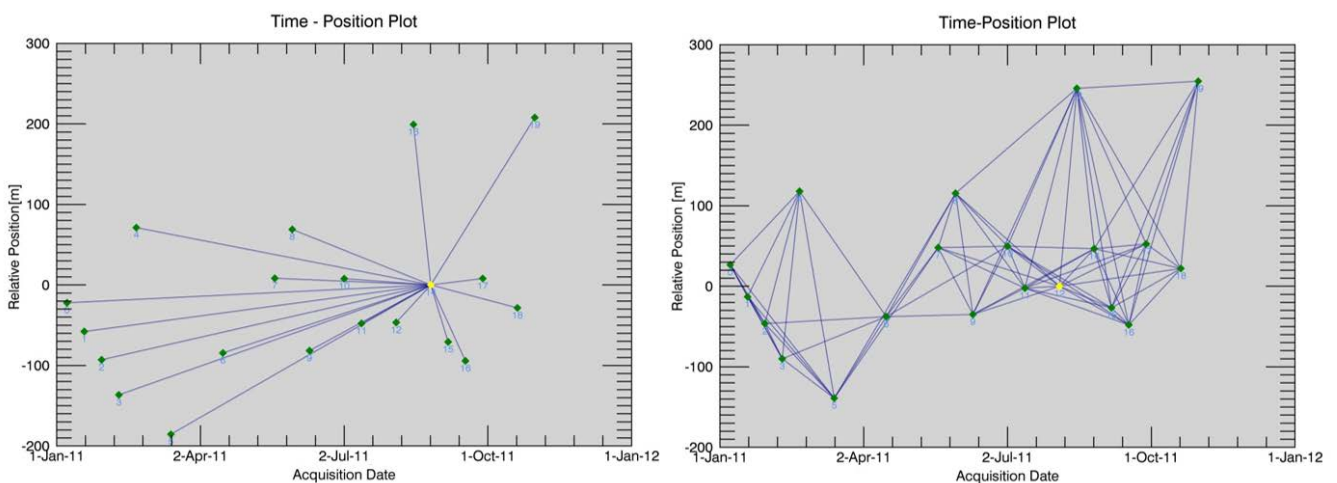


Abb. 7: Räumliche und zeitliche Verbindungen zwischen Referenzaufnahme und weiteren Datensätzen für die PSI-Auswertung (links) und die SBAS-Auswertung (rechts). Die SBAS-Auswertung verwendet mehrere Bezugsdatensätze und eine Untermenge der weiteren Datensätze in Bezug zu den Referenzszenen.

### 5 Terrestrische Mikrowelleninterferometrie

Die terrestrische Mikrowelleninterferometrie ist ein Messsystem, mit dem geometrische Veränderungen von Infrastrukturbauperken oder natürlichen Objekten flächenhaft, präzise und in kurzer Zeitfolge bestimmt werden können (Pieraccini et al. 2006). Die Funktionsweise basiert auf den gleichen interferometrischen Mess- und Auswerteprozessen wie bei der satellitengestützten Radarinterferometrie.

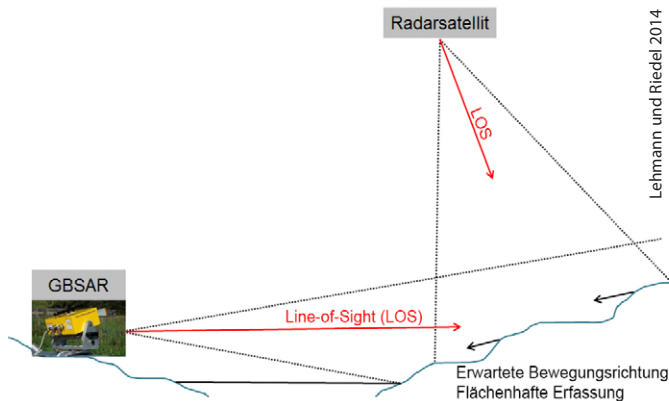


Abb. 8: Durch die freie Standpunktauswahl des terrestrischen Mikrowellensystems gegenüber dem fixen Orbit des Radarsatelliten ist eine optimierte Erfassung bzw. höhere Sensitivität bzgl. der Bewegungskomponenten des Objekts möglich.

Durch die direkte Ausrichtung des terrestrischen Radarsystems auf das Untersuchungsobjekt erfolgt eine messtechnische Beobachtung des Objektes in direkter Blickrichtung auf das Objekt, entsprechend der LOS des Satelliten, siehe Abb. 8. Auch hier ist es dann ggf. notwendig, das aufgezeichnete Bewegungssignal entsprechend der Objektbewegung noch in horizontale bzw. vertikale Bewegungskomponenten zu zerlegen.

Bewegt oder deformiert sich die Objekt Oberfläche, so ergibt sich bei wiederholter Erfassung mit dem terrestrischen Radarsystem eine abweichende Phasenlage, die letztendlich in das metrische System umgerechnet werden kann.

Vergleichbar zur satellitengestützten Signalauswertung ergibt sich hier die interferometrische Phasenänderung für die Objektverschiebung nach (1) (Rödelsperger et al. 2010). Durch die kontinuierliche Messung mit dem Sensor von einem festen Gerätestandpunkt aus, kann (1) vereinfacht werden zu:

$$\Delta\varphi = \varphi_{disp} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} + 2\pi \cdot n, \tag{5}$$

wobei das gesuchte Deformationssignal  $\varphi_{disp}$  ist.

Die meisten terrestrischen Systeme arbeiten im Ku-Band bzw. im X-Band mit einer Wellenlänge von 1,8 cm bzw. 3 cm (siehe Tab. 1). Dieser Frequenzbereich ist stark vom Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre beeinflusst und entsprechende Korrekturen können entweder über die Berücksichtigung stabiler Punkte oder durch meteorologische Korrekturen abgefangen werden (Lehmann und Riedel 2014).

Portable terrestrische Mikrowelleninterferometer, die für den ingenieurgeodätischen Einsatz geeignet sind, werden in dem Beitrag von Montserrat et al. (2014) beschrieben. Eine tabellarische Übersicht befindet sich in Läufer et al. (2015). Diese terrestrischen Mikrowellensysteme können sowohl mit realer Apertur als auch mit synthetischer Apertur eingesetzt werden. Die Nutzung der realen Apertur dient der profilhaften dynamischen Erfassung eines Objektes, gleichbedeutend einer berührungslosen und hochfrequenten Objekterfassung (Abb. 9).

Der typische Anwendungsfall ist die Bestimmung der Auslenkung und der Eigenschwingungen von Bauwerken, wie Brücken oder hoher Türme, mit einer möglichen Messfrequenz bis zu 200 Hz und mit einer Präzision im sub-mm-Bereich (Gentile und Bernardini 2010, Montserrat et al. 2014).

Wird der Sensorkopf linear auf einer Schiene senkrecht zum Objekt bewegt, wird die linienhafte Aufnahme mit realer Apertur durch die darauffolgenden schrittweisen oder kontinuierlichen und überlappenden Erfassungen zu einer Aufnahme mit synthetischer Apertur und man erhält eine zweidimensionale, flächenhafte Abbildung des Objektes mit hoher geometrischer Auflösung (Lehmann und Riedel 2014). Die Auflösung in LOS liegt i. d. R. im Bereich unter einem Meter. Bautechnisch lässt sich eine höhere Winkelauflösung bzw. die flächenhafte Objekterfassung auch durch Rotation des Antennensystems realisieren (Läufer et al. 2015).

Die Anwendungsfälle für flächenhafte Fragestellungen sind z. B. die Überwachung von Staumauern, Böschungen und Hangrutschungen, da die berührungslosen Messsysteme bis zu einer Entfernung von mehreren Kilometern zum Objekt ausgelegt ist (Riedel et al. 2011, Butt et al. 2020). Die erreichbaren Genauigkeiten für die Ableitung der Objektbewegung liegen über Distanzen von wenigen Kilometern im mm-Bereich (Lehmann und Riedel 2014).



Abb. 9: Messung windinduzierter Schwingungen eines 180 m hohen Schornsteins mit drei exemplarisch ausgewählten Rückstreuern, farbige Ringe (s. a. Abb. 12)

## 6 Exemplarische Anwendungsmöglichkeiten

### 6.1 Multitemporale Interferometrie

Die Nutzung der satellitengestützten Radarinterferometrie auf Basis der PSI-Auswertung ist gerade durch die Verfügbarkeit der vielen X-Band-Missionen hervorragend zum Monitoring von Infrastrukturobjekten und ihrer Umgebung geeignet. Auch die zeitliche Auflösung von wenigen Tagen bis zur täglichen Datenerfassung und

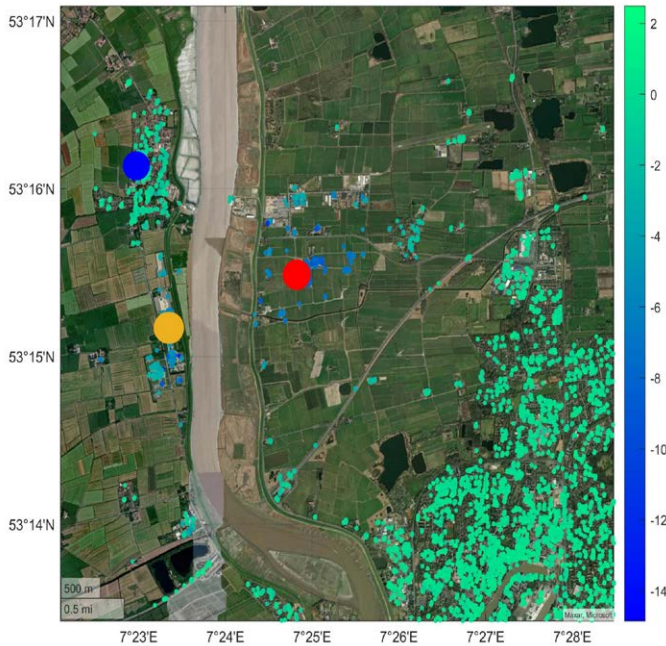


Abb. 10: Ausschnitt aus einer großräumigen PS-Prozessierung von Sentinel-1-Daten für einen bewegten Bereich an der Erdoberfläche in Blau sowie unterschiedliche Punktdichten im ländlichen Raum und für ein Stadtgebiet im Umland. Die Farbskala stellt die mittlere Geschwindigkeit in LOS in mm/a dar, stabile Punkte bzw. PS sind in Grün mit einer Unsicherheit von  $\pm 2$  mm/a dargestellt. Kreise markieren die Positionen der PS-Zeitreihen in Abb. 11.

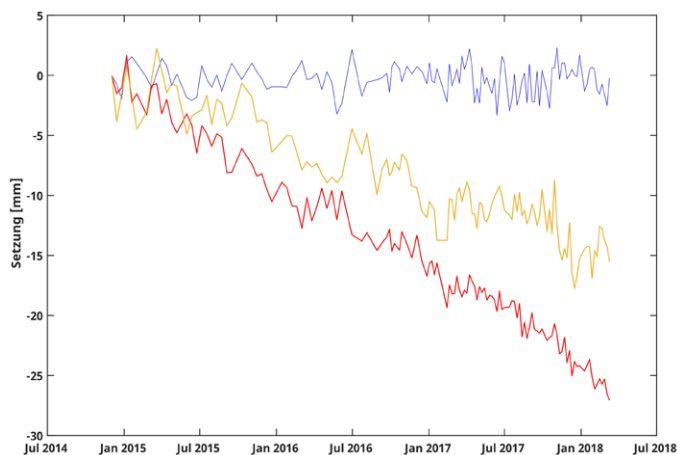


Abb. 11: Die drei Zeitreihen stellen die Vertikalbewegung der in Abb. 10 farblich markierten PS über den Beobachtungszeitraum von dreieinhalb Jahren dar.

die räumliche Auflösung von wenigen Metern bis in den Halbmeter-Bereich zeigt die grundsätzliche Eignung für Monitoringaufgaben. Die Verfügbarkeit der kostenfreien Sentinel-1-Aufnahmen ermöglicht ebenfalls ein großräumiges ingenieurgeodätisches Monitoring, allerdings mit geringerer Diskretisierungsdichte.

Erste Beispiele zum innerstädtischen Monitoring mit C-Banddaten finden sich z. B. in Deffontaines et al. (2004) in Paris oder mit C- und X-Banddaten für Barcelona bei Crosetto et al. (2010). Monitoring beim U-Bahnbau mit X-Banddaten in Düsseldorf wurde von Mark et al. (2012) beschrieben. In den vergangenen Jahren sind zahlreiche Fallstudien in der Anwendung der multitemporalen PS-Auswertung unter Nutzung der X-Band- und C-Banddaten publiziert worden und finden sich z. B. in Tagungsbeiträgen der Veranstaltungsreihe GeoMonitoring ([www.geo-monitoring.org](http://www.geo-monitoring.org)).

Als exemplarisches Ergebnis einer multitemporalen C-Band-PSI-Auswertung von Sentinel-1-Daten sind hier die Zeitreihen einiger PS-Punkte im Bereich einer Industrieanlage (blaue Punkte) und ihrem Umland dargestellt (Abb. 10), wie auch stabile Punkte (Farbcodierung in Grün) außerhalb des Einflussbereiches. Sehr gut ist auch die unterschiedliche Punktdichte pro km<sup>2</sup> zwischen Ortslage und ländlichem Raum zu erkennen.

Typische Zeitreihen für einzelne, ausgewählte PS (farbige Kreise) aus der SBAS-Prozessierung mit einem kommerziellen Softwarepaket für den Bereich aus Abb. 10 zeigt Abb. 11.

Die LOS-Bewegungen wurden über den Aufnahmezeitraum von Dezember 2014 bis März 2018 umgerechnet. Vergleichbare Ergebnisse kann man für diesen Bereich auch im Internetportal des Bodenbewegungsdienstes der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de>) abrufen.

### 6.2 Terrestrische Mikrowelleninterferometrie

Wie bereits in Abschnitt 5 erläutert, bietet die terrestrische Mikrowelleninterferometrie neben der höheren zeitlichen Auflösung der Objekterfassung gerade im Hinblick auf dynamische Prozesse einen Mehrwert gegenüber der satellitengestützten Radarinterferometrie. Auch die freie Wahl der Ausrichtung des Sensors auf das Untersuchungsobjekt stellt einen erheblichen Vorteil dar, da hier im Idealfall die Ausrichtung des Sensors bzw. der Sensitivität in LOS in der zu erwartenden bzw. bekannten Bewegungsrichtung erfolgen kann. Abb. 12 stellt die LOS-Bewegungen der drei farblich markierten Streuer aus Abb. 9 dar.

Ein anderer typischer Einsatzbereich der terrestrischen Mikrowellenferometrie ist die Bestimmung der Auslenkungen einer Brücke, wie in Abb. 13 dargestellt. Hier wurden die Querträger auf der Brückenunterseite als natürliche, markante Rückstreuer genutzt (Abb. 13A). In Abb. 13B erkennt man deutlich das stärkere Rückstreu-



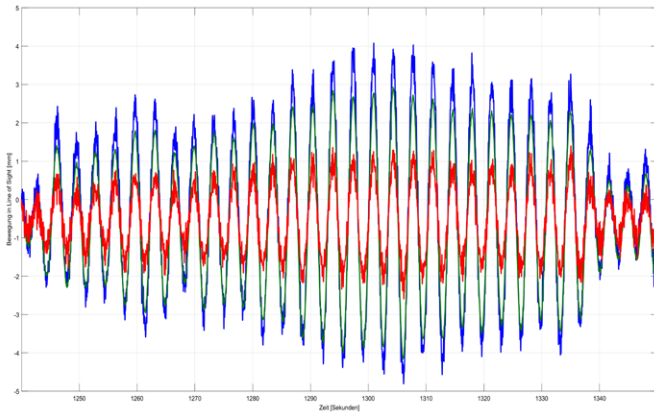


Abb. 12: Schwingungssignal des Schornsteins aus Abb. 9 in LOS im mm-Bereich für markante Streuer im oberen Bereich des Schornsteins über einen Zeitraum von 120 Sekunden

signal der Querträger entlang des Messprofils gegenüber der Brückenunterseite.

Die in Abb. 13C dargestellten vertikalen Auslenkungen des mittleren Querträgers der Brückenunterseite zeigen im Bereich von 50 bis 100 s (Ellipse A) den Einfluss der ambienten Vibration auf das Objekt, im Bereich von 125 bis 425 s (Ellipse B) verschiedene statische Belastungsstufen und im Bereich von 425 bis 575 s (Ellipse C) dynamische Belastungsfälle (Riedel und Lehmann 2012).

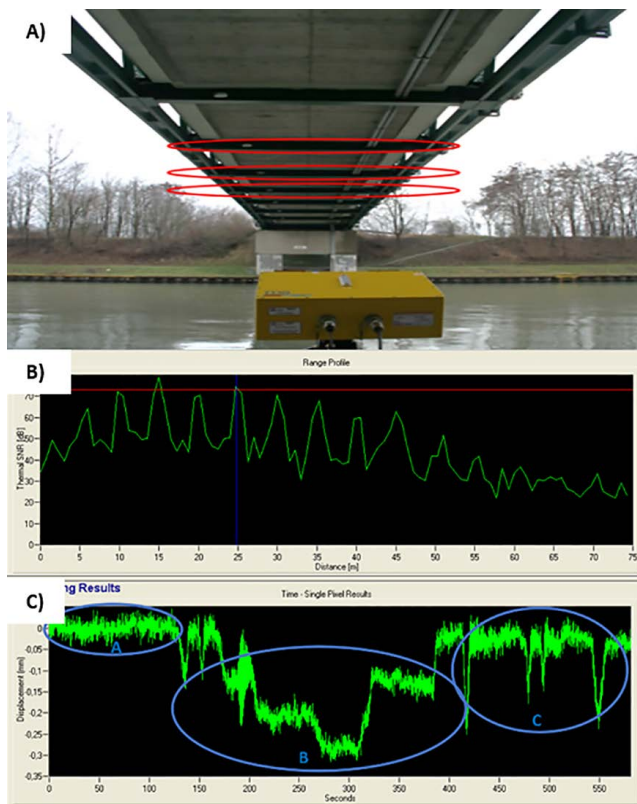


Abb. 13: A) Brückenunterseite mit Radarkopf und Stahlquerträger, die als natürliche Reflektoren genutzt wurden. B) Signal-Rauschverhältnis entlang LOS mit den deutlichen Peaks der Rückreflexionen der Querträger des Brückenunterbaus. C) Auslenkungen des Querträgers (Zehntel-mm) in Brückenmitte bzgl. verschiedener Lastfälle.

Derartige Messungen können ohne Signalisierung am Objekt erfolgen und liefern neben einer diskretisierten Biegelinie auch die dazugehörige Information über die Eigenfrequenzen des Bauwerkes und können somit einen Beitrag zum Structural Health Monitoring leisten. Weitere Anwendungsfälle zum Brückenmonitoring mit Vergleichsbeobachtungen von Lasertrackern und Laserscannern finden sich u. a. in Paffenholz et al. (2018), Schill et al. (2022) und Michel (2023).

## 7 Fazit

In diesem Beitrag wurden grundlegende Messmethoden der satellitengestützten und terrestrischen Radarinterferometrie für die Anwendung in der Ingenieurgeodäsie dargestellt, die die vielfältigen Methoden der Ingenieurgeodäsie deutlich in Raum und Zeit erweitern.

Durch die kontinuierliche, satellitengestützte Erfassung der Erdoberfläche ist die routinemäßige Überwachung von Setzungsgebieten möglich und die zeitaufwendige und personalintensiven GNSS- oder Nivellement-Messkampagnen können reduziert werden bzw. der lokalen Verdichtung dienen. Durch die Wiederholrate von wenigen Tagen erhält man mehr Information über das lokale Verhalten als durch die epochalen terrestrischen Beobachtungen.

Vereinzelt werden diese Verfahren auch schon operativ in der Praxis genutzt. Im Bereich der terrestrischen Mikrowelleninterferometrie bieten die Hersteller der Hardware auch entsprechende 7/24-Dienstleistungen für Monitoringaufgaben an. Ähnliches gilt für die Firmen, die Auswertesoftware im Bereich der satellitengestützten Radarinterferometrie entwickeln. Die Nutzung von Satellitendaten ist auch in Zukunft durch entsprechende Programme der Weltraumagenturen gesichert.

Die Nutzung von terrestrischen Radarsystemen auf bewegten Plattformen, wie Autos oder Hubschraubern, ist ebenfalls schon in Erprobung und wird den Anwendungsbereich deutlich erweitern, wie auch die operative Nutzung anderer Frequenzbänder.

## Literatur

- Agram, P.S. (2010): Persistent Scatterer Interferometry in Natural Terrain. Ph.D. thesis, Stanford University.
- Bamler R., Adam N., Hinz S., Eineder M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Wichmann Verlag, 243–252.
- Berardino P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 11, 2375–2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Brockmeyer M., Schnack, C., Jahn, C.-H. (2020): Datenanalyse und flächenhafte Modellierung der PSI-Informationen des Bodenbewegungsdienst Deutschlands für die Landesfläche Niedersachsens. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2020, 145. Jg., 154–167. DOI: 10.12902/zfv-0300-2020.

- Butt, J., Gojic, Z., Schmid, L., Wieser, A. (2020): Terrestrische Radarinterferometrie und terrestrisches Laserscanning zur Überwachung alpiner Geländes: Praxiserfahrungen und Theorie. In: Tagungsband Geomonitoring 2020, 187–206. DOI: 10.15488/9350.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., Crippa, B. (2015): Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., Crippa, B. (2010): Persistent scatterer interferometry: Potential, limits and initial C- and X-band comparison. *Photogramm. Eng. Remote Sens* 2010, 76, 1061–1069.
- DIN 18710-1 (2010): Deutsche Norm: Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18710-4 (2010): Deutsche Norm: Ingenieurvermessung – Teil 4 Überwachung. Beuth Verlag, Berlin.
- Hering, E., Martin, R. (2017): *Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. DOI: 10.3139/9783446445093.004.
- ESA (2021): Sentinel-1. ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Service. ISBN 978-92-9221-418-0.
- ESA (2023): [www.eoportal.org/satellite-missions](http://www.eoportal.org/satellite-missions), letzter Zugriff 08.05.2023.
- Esch, C., Köhler, J., Gutjahr, K., Schuh, W.-D. (2019): 25 Jahre Bodenbewegungen in der Niederrheinischen Bucht – Ein kombinierter Ansatz aus D-InSAR und amtlichen Leitnivelements. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2019, 144. Jg., 173–186. DOI: 10.12902/zfv-0257-2019.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci, A. (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, issue 9, 3460–3470.
- Gefeller, V., Riecken, J., Krickel, B. (2020): Anwendung der Radarinterferometrie in der Landesvermessung NRW. In: Tagungsband Geomonitoring 2020, 21–27. DOI: 10.15488/9338.
- Gentile, C., Bernardini, G. (2010): An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6:5, 521–534. DOI: 10.1080/15732470903068557.
- Isya, N.H., Niemeier, W., Gerke, M. (2019): 3D Estimation of slow ground motion using InSAR and the slope aspect assumption, a case study: the Puncak pass landslide, Indonesia. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2/W5, 623–630. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-623-2019.
- Jensen, J.R. (2007): *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd Edition)*, Pearson, Upper Saddle River.
- Joeckel, R., Stober, M., Huop, W. (2008): *Elektronische Entfernungsmessung und Richtungs-messung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2008, 526 Seiten, ISBN 978-3-87907-443-3, E-Book: ISBN 978-3-87907-704-5.
- Kalia, A., Frei, M., Lege, T. (2021): Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 4/2021, 146. Jg., 273–279. DOI: 10.12902/zfv-0365-2021.
- Klausing und Holpp (2014): *Radar mit realer und synthetischer Apertur Konzeption und Realisierung* Buch. Hardcover Reprint 2014. 1999, XII, 411 S., De Gruyter Oldenbourg, ISBN 978-3-486-23475-6.
- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., Niemeier, W. (2013): Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 6/2013, 138. Jg., 391–399.
- Läufer G., Lehmann M., Rödel-sperger S. (2015): Terrestrische Mikrowelleninterferometrie. In: *Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie*. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2\_23-1.
- Lege, T., Kalia, A., Frei, M. (2019): Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschlands. In: Tagungsband Geomonitoring 2019, 37–47. DOI: 10.15488/4511.
- Lehmann, M., Riedel, B. (2014): Untersuchungen zum räumlichen Auflösungsvermögen bei terrestrischer Mikrowelleninterferometrie. *Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn)*.
- Mark, P., Niemeier, W., Schindler, S., Blome, A., Heek, P., Krivenko, A., Ziem, E. (2012): Radarinterferometrie zum Setzungsmonitoring beim Tunnelbau. Anwendung am Beispiel der Wehrhahn-Linie in Düsseldorf. *Bautechnik* 89, Heft 11, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- Michel, C.E. (2023): *Generic Radar Processing Methods for Monitoring Tasks on Bridge Infrastructure*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). DOI: 10.5445/IR/1000158805.
- Monserrat, O., Crosetto, M., Luzi, G. (2014): A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 93.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowski, S., Cabral-Cano, E. (2016): Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 115. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003.
- Paffenholz, J., Stenz, U., Neumann, I., Dikhoff, I., Riedel, B. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung. In: *Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk Kalender 2018*. DOI: 10.1002/9783433608050.ch9.
- Riecken, J., Krickel, B., Gefeller, V., Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 6/2019, 144. Jg., 354–361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- Riedel, B., Lehmann, M., Liu, D., Niemeier, W. (2011): Einsatz von GBSAR zur Erfassung des Bewegungsverhaltens einer Böschung im ehemaligen Braunkohletagebau. In: *Busch, W., Niemeier, W., Soergel, U. (Hrsg.): Geomonitoring – Tagung 2011*. Clausthal.
- Riedel, B., Lehmann, M. (2012): Erfassung von lastbedingten Veränderungen an Brückenbauwerken mittels terrestrischer Radarinterferometrie. In: *Löwner, M.-O., Hillen, F., Wohlfahrt, R. (Hrsg.): Geoinformatik 2012 »Mobilität und Umwelt«, Konferenzband zur Tagung Geoinformatik 2012, 28.–30.03.2012 in Braunschweig, 439 S., ISBN 978-3-8440-0888-3*.
- Rödelsperger, S., Läufer, G., Gerstenecker, C., Becker, M. (2019): Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L. Vol. 4, no. 1, 41–54. DOI: 10.1515/jag.2010.005.
- Schill, F.; Michel, C., Firus, A. (2022): Contactless Deformation Monitoring of Bridges with Spatio-Temporal Resolution: Profile Scanning and Microwave Interferometry. *Sensors* 2022, 22, 9562. DOI: 10.3390/s22239562.
- TSX (2011): SLC-Daten von TerraSAR-X. Aufnahme am 9.2.2011 im Stripmap-Modus, Proposal ID CAL 1140.
- Walter, D. (2012): Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle auf die Qualität radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen. Clausthal-Zellerfeld, Universitätsbibliothek Clausthal.
- Xi, F., Busch, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. Tagungsband Geomonitoring 2018. ISBN 978-3-86948-627-7.

#### Kontakt

Dr.-Ing. Björn Riedel  
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
 Technische Universität Braunschweig  
 Bienroder Weg 81, 38106 Braunschweig  
 b.riedel@tu-bs.de

Prof. Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz  
 Clausthal University of Technology (TUC), Institute of Geo-Engineering, Chair of Geomatics for Underground Systems  
 Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld  
 jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de