



**Sabine Rödelsperger,
Gwendolyn Läufer,
Carl Gerstenecker,
Matthias Becker**

Terrestrische Mikrowelleninterferometrie – Prinzip und Anwendungen

Am 25. November 2010 vollendet Bernhard Wrobel sein 75. Lebensjahr. Er legte in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts mit seinem visionären Konzept des „Fast Vision“ die theoretischen Grundlagen für die hier beschriebene Messtechnik. Ihm ist dieser Artikel gewidmet.

In diesem Beitrag wird anhand des Messgerätes IBIS das Potential der terrestrischen Mikrowelleninterferometrie im Bereich der Überwachung von Bauwerken und Naturgefahren dargestellt. Drei ausgewählte Beispiele (Bestimmung von Eigenfrequenz und Eigenform eines Windrades, Beobachtung von Belastungen einer Brücke während des laufenden Betriebs, Beobachtung von Rutschungsbewegungen in einem Steinbruch) zeigen die Einsatzmöglichkeiten sowie Vor- und Nachteile von IBIS gegenüber herkömmlichen Instrumenten auf.

Schlüsselbegriffe: Mirowelleninterferometrie, Bodengestütztes Radar mit synthetischer Apertur, IBIS, Bauwerksüberwachung, Naturgefahren

In this contribution, the potentials of terrestrial microwave interferometry for monitoring buildings and natural hazards are discussed. Three examples of application, carried out with the microwave interferometer IBIS, are presented: the determination of eigenfrequencies and eigenmodes of a wind turbine, the observation of load of a bridge and the observation of mass movements in a quarry. The advantages and disadvantages of the instrument in contrary to traditional instrumentation are discussed.

Keywords: Microwave interferometry, Ground based Synthetic Aperture Radar, IBIS, Structural monitoring, Natural hazards

1 Einleitung

Der Satellit SEASAT wurde 1978 in seine Umlaufbahn geschossen. Mit an Bord war ein bildgebendes „Synthetic Aperture Radar“ (SAR) (HOVANESSIAN, 1980). Die damit aufgezeichneten Radar-Szenen waren die ersten Aufnahmen der Erdoberfläche, die mit Hilfe der Mikrowelleninterferometrie (Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)) ausgewertet wurden (ZEBKER and GOLDSTEIN, 1986; GABRIEL et al., 1989; MASSONNET and FEIGL, 1998; HANSEN, 2002). Bereits hier waren die Vorteile dieser neuen Fernerkundungstechnologie zu erkennen, die es erlaubt, hochauflösende Digitale Geländemodelle (DGMs) der Erdoberfläche und deren Änderungen mit sehr hoher Auflösung unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen berührungslos zu erfassen.

SAR-Geräte sind seit 1990 ein fester Bestandteil des Instrumentariums, das in für die Erdbeobachtung bestimmte Satelliten installiert wird. Radarszenen, die mit den Satelliten ERS1, ERS2, JERS, RADARSAT, ENVISAT oder TerraSAR-X aufgenommen wurden, erlauben die Erzeugung genauer DGMs und die flächenhafte Bestimmung von Höhenänderungen mit einer Auflösung von $\pm 0,1$ mm. So wurde mit der Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 80 % der festen Erdoberfläche in einem einheitlichen DGM erfasst.

Es liegt nahe, dass Anstrengungen unternommen wurden, die im Weltraum erprobte Technologie in Flugzeugen

(KRAMER, 2002) und bodengestützt (terrestrisch) einzusetzen. Erste Entwicklungen für ein bodengestütztes InSAR-System wurden in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts gestartet (e.g. FARRAR et al. 1999, TARCHI et al. 2003, PIERACCINI et al. 2005, HARRIS et al. 2006). Seit 2007 wird von der Firma IDS, Pisa, Italien das Gerät IBIS (Image by Interferometric Survey) kommerziell angeboten, das aus einer Zusammenarbeit der Firma IDS und der Universität Florenz entwickelt wurde (TARCHI et al., 2003; PIERACCINI et al. 2005; BERNADINI et al., 2007). Es kann in zwei Versionen betrieben werden: IBIS-S ist ein bodengestütztes Mikrowelleninterferometer, das Bewegungen entlang eines Profils eines Bauwerks liefert; IBIS-L ist ein bodengestütztes InSAR, das flächenhaft Bewegungen großer Bauwerke und Strukturen erfasst. Im Gegensatz zum weltraumgestützten InSAR liegt die Messrate bei IBIS-L deutlich höher (Einige Minuten im Gegensatz zu einigen Tagen). Dadurch können wesentlich komplexere Vorgänge erfasst werden.

Die Anwendungen von IBIS sind vielfältig im Bereich der Geowissenschaften (z. Bsp. Beobachtung von Naturgefahren wie Hangrutschungen, Gletscher, Vulkanflanken, etc.) und des Bauwesens (z. Bsp. dynamisches und statisches Verhalten von Dämmen, Brücken, Türmen, etc.). Im Rahmen des Projektes Exupery, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Zuge des Geotechnologienprogramms gefördert wurde, konnte die TU Darmstadt ein entsprechendes Gerät beschaffen.

In den folgenden Abschnitten wird die Funktionsweise von IBIS und der Mikrowelleninterferometrie beschrieben. Anwendungsbeispiele geben einen Eindruck über das Potential dieser neuen Messmethode. Nötige Entwicklungsarbeiten, um das Anwendungsspektrum zu erweitern, werden diskutiert.

2 Mikrowelleninterferometrie

2.1 Grundlagen

Das Erfassen von Bewegungen mittels Mikrowelleninterferometer basiert auf der Messung von Amplitude (Intensität) und Phase einer elektromagnetischen Welle die vom Radargerät ausgesendet und am Zielobjekt reflektiert wird. Die interferometrische Phase, d.h. die Differenz der Phase zweier Messungen, liegt immer im Bereich $-\pi$ bis π . Der Zusammenhang zwischen Objektbewegung und interferometrischer Phase ϕ ist gegeben durch

$$\phi = \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_{noise} - 2\pi \cdot n. \quad (1)$$

Die linke Seite ist die beobachtete Größe, die rechte Seite enthält die unbekanntenen Größen:

- ϕ_{disp} , die Bewegung des Zielobjekt in Blickrichtung des Radars,
- ϕ_{atm} , die Änderungen der Atmosphäre zwischen Radar und Zielobjekt,
- ϕ_{noise} , Rauschen,
- n , die Anzahl von Phasendurchgängen (Mehrdeutigkeit).

Offensichtlich ist die Bestimmung der Bewegungen des Zielobjektes nur mit zusätzlichen Beobachtungen oder Annahmen möglich, da die Anzahl der Unbekannten die Anzahl der Messgrößen übersteigt. Die Größen ϕ_{atm} , ϕ_{noise} und vor allem n müssen abgeschätzt oder anderweitig bestimmt werden. Die Objektbewegung Δr_{disp} kann dann aus ϕ_{disp} abgeleitet werden

$$\phi_{disp} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{disp}, \quad (2)$$

wobei λ die verwendete Wellenlänge ist.

Die Phasenmessgenauigkeit σ_ϕ ist direkt an das Signal-Rausch Verhältnis (SNR) des reflektierten Signals gekoppelt (JUST und BAMLER, 1994; HANSEN, 2002)

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (3)$$

Das SNR wird maßgeblich bestimmt durch die Reflektivität eines Objektes, die zum einen vom Material und zum anderen von der Geometrie des Messobjektes abhängt. Fels, Metallkanten, Betonecken und ähnliche Strukturen reflektieren besonders gut, während bei glatten Oberflächen aufgrund der überwiegenden Vorwärtsreflexion nur wenig Energie zurückgestreut wird. Besonders problematisch ist Vegetation, einerseits wegen der geringen Rückstreuung, andererseits wegen der ständigen Bewegung im Wind, die leicht zum Verlust der Kohärenz führt, d.h. die interferometrische Phase ist zufällig verteilt. Der Störeinfluss von Vegetation hängt stark von der verwendeten Wellenlänge ab. Signale kurzer Wellenlänge (mm bis einige cm) werden hauptsächlich von der Oberfläche

der Vegetation reflektiert, während Signale längerer Wellenlänge die Vegetation durchdringen und vom Boden reflektiert werden. Äußere Einflüsse, wie Regen oder Schnee, beeinflussen die Phasenmessgenauigkeit negativ, da das Signal gedämpft wird.

Atmosphärische Effekte können beträchtliche Größen annehmen. Der Zusammenhang von meteorologischen Parametern und atmosphärisch bedingter Phasenänderung ist gegeben durch (SMITH and WEINTRAUB, 1953; ZEBKER et al., 1997)

$$\phi_{atm} = -\frac{\lambda}{4\pi} \left(7.76 \times 10^{-5} \int_0^R \frac{P}{T} dr + 3.73 \times 10^{-1} \int_0^R \frac{e}{T^2} dr \right). \quad (4)$$

Ein Anstieg der Feuchte von 1 % bei einer Temperatur von 20 °C verursacht eine Änderung der Strecke um 2 mm für ein Zielobjekt in 1 km Abstand.

Verschiedene Methoden zur atmosphärischen Korrektur existieren (ZEBKER et al., 1997; LUZI et al., 2004). In kurzen Entfernungsbereichen (einige 100 m) können die meteorologischen Parameter als räumlich konstant betrachtet werden

$$\phi_{atm} = a_1 \cdot r. \quad (5)$$

Der Parameter a kann entweder aus meteorologischen Daten gemäß (4) bestimmt oder unter Verwendung stabiler Referenzpunkte (d.h. Zielobjekte deren Bewegung bekannt oder null ist) geschätzt werden. Für größere Entfernungsbereiche können Modelle höherer Ordnung verwendet werden

$$\phi_{atm} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r^i, \quad (6)$$

oder räumliche Filtertechniken zum Einsatz kommen. Der Vorteil der Verwendung von stabilen Referenzpunkten ist die höhere Genauigkeit der atmosphärischen Korrektur, da, vor allem bei großen Entfernungen, punktuelle meteorologische Beobachtungen die atmosphärischen Bedingungen entlang des Ausbreitungsweges nur ungenügend beschreiben. Nachteil jedoch ist, dass eine gleichmäßige Verteilung von stabilen Referenzpunkten im Messgebiet nicht immer gegeben ist und dadurch die Korrektur systematisch verfälscht werden kann. Optimal ist die Kombination von meteorologischen Daten und stabilen Referenzpunkten, da meteorologische Daten die zeitlich langwelligen Anteile der Refraktion gut erfassen können, während zur Korrektur des zeitlich kurzwelligen Anteils die Referenzpunkte dienen können.

In der Praxis kann, je nach Anwendung, die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten n eine anspruchsvolle Aufgabe sein. Die interferometrische Phase zweier aufeinander folgender Messungen liegt immer im Bereich $-\pi$ bis π (d.h. $-\lambda/4$ bis $\lambda/4$ aufgrund der doppelten Wegstrecke). Damit können Bewegungen, die zwischen zwei Messungen ein Viertel der Wellenlänge übersteigen, nicht als solche erkannt werden, da keine absoluten Entfernungen bestimmt werden.

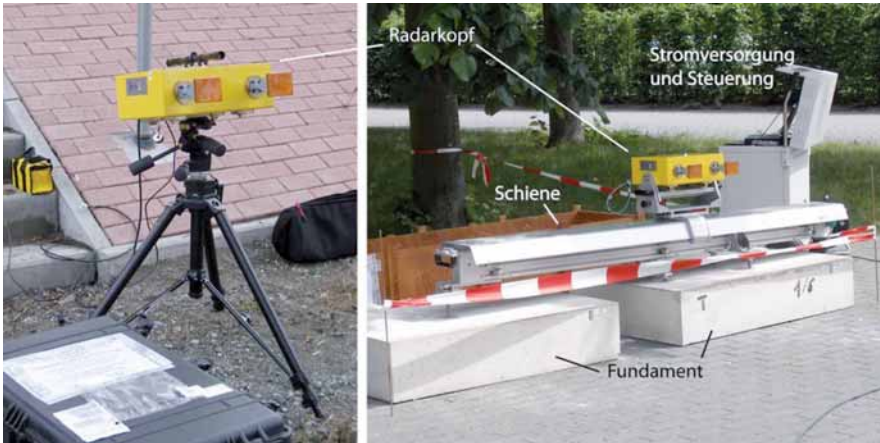


Abb. 1: IBIS-S (links) und IBIS-L (rechts)

2.2 IBIS: Image By Interferometric Survey

IBIS steht für Image By Interferometric Survey und ist ein kommerziell erhältliches Mikrowelleninterferometer, das von der Firma IDS vertrieben wird. IBIS gibt es in zwei Konfigurationen: IBIS-S und IBIS-L (Abb. 1). Der Radarkopf mit Sende- und Empfangsantenne ist bei beiden Konfigurationen identisch. Er sendet kontinuierlich Mikrowellen mit einer Frequenz im Bereich von 17,2 GHz aus (Ku-Band, 17,4 mm Wellenlänge) und empfängt und verarbeitet die reflektierten Signale. Der Öffnungswinkel der Hauptkeule der Antenne (-3 dB) beträgt 17° horizontal und 15° vertikal. Grundsätzlich kann das Gerät auch mit anderen Frequenzen und Antennen betrieben werden.

Der Unterschied beider Konfigurationen liegt im räumlichen Auflösungsvermögen (Abb. 2). Im Fall von IBIS-S ist der Radarkopf auf einem Stativ montiert, wodurch Ziele in verschiedenen Entfernungen voneinander unterschieden werden können (Entfernungsauflösung). Bei IBIS-L ist der Radarkopf beweglich auf einer Schiene montiert. Dadurch können zusätzlich noch Ziele mit verschiedenen Horizontalwinkeln unterschieden werden (Azimutauflösung), d.h. es werden zweidimensionale Phasen- und Intensitätsbilder erzeugt.

Um Entfernungsauflösung zu erzielen, wird die Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) Technik eingesetzt (TAYLOR, 2001). Der Radarkopf sendet kontinuierlich ein Signal konstanter Amplitude, wobei die Frequenz innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite schrittweise erhöht

wird. Die Dauer der Aussendung einer Frequenz ist abhängig von der Maximalentfernung des Objekts. Für jede Frequenz werden Amplitude und Phase gemessen und nach Durchlauf der gesamten Bandbreite über eine Inverse Fourier Transformation (IFT) in den Ortsraum transformiert. Dieser Schritt wird als Fokussierung bezeichnet. Die Auflösung im Ortsraum (in Blickrichtung des Radars) δ_r ist abhängig von der Bandbreite B

$$\delta_r = \frac{c}{2B}, \quad (7)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Mit einer maximalen Bandbreite von 200 MHz kann mit IBIS-S eine Auflösung von 0,75 m in Blickrichtung erreicht werden, d.h. zwei Reflektoren können als zwei getrennte Ziele wahrgenommen werden, wenn sich ihr Abstand um mehr als 0,75 m unterscheidet. Die maximale Messrate beträgt 200 Hz.

IBIS-L ist ein bodengestütztes Radar mit synthetischer Apertur. Um Azimutauflösung zu erzielen, wird der Radarkopf auf einer Schiene montiert entlang derer er quer zur Blickrichtung bewegt wird. Durch die Bewegung der realen Antenne auf der Schiene, wird die Antenne künstlich verlängert (synthetische Apertur). Nach jedem Schritt auf der Schiene wird das SFCW Signal ausgesendet. Durch die Bewegung auf der Schiene, ist das reflektierte Signal zusätzlich von der Position des Sensors auf der Schiene abhängig, da sich die Entfernung zwischen Sensor und Objekt leicht ändert. Auch hier können Amplitude und Phase über eine IFT in den Ortsraum transformiert

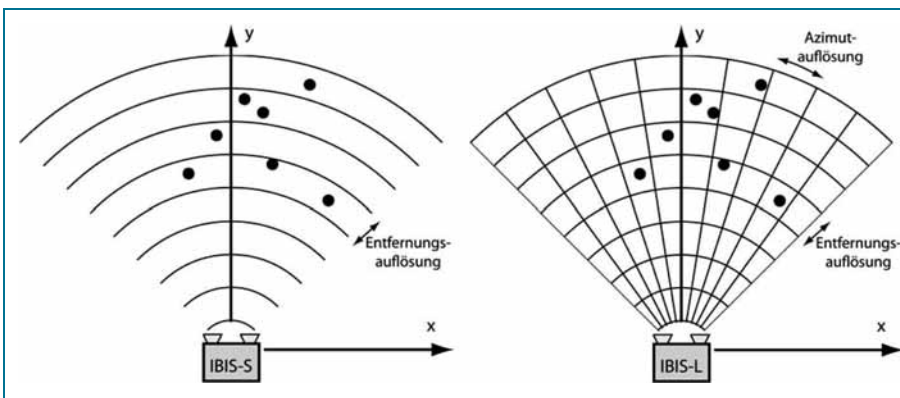


Abb. 2: Räumliches Auflösungsvermögen von IBIS-S (links) und IBIS-L (rechts).

werden. Die Azimutauflösung ist abhängig von der Länge der Schiene L und Wellenlänge λ

$$\delta_a = \frac{\lambda}{2L}. \quad (8)$$

Mit einer Schienenlänge von 2 m kann mit IBIS-L eine Azimutauflösung von 4,4 mrad (entspricht 4,4 m in 1000 m Entfernung) erreicht werden. Die maximale Messrate beträgt 5 bis 10 min je nach Entfernung. Eine Übersicht über die Spezifikationen von IBIS-S und IBIS-L ist in Tab. 1 gegeben.

2.3 Anwendungen

Die Anwendungsbereiche von IBIS sind vielfältig im Bereich des Bauwesens sowie der Geowissenschaften. Sie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bestimmung der Eigenfrequenzen und Eigenformen von Bauwerken (z. Bsp. Schornsteine, Windkraftanlagen, Hochhäuser und Brücken) mit IBIS-S (BERNADINI et al., 2007; GENTILE und BERNADINI, 2009),
- Belastungstest von Bauteilen und Brücken mit IBIS-S,
- Monitoring von Bauwerken mit IBIS-S und ausgedehnten Strukturen (z. Bsp. Staudämmen) mit IBIS-L (ALBA et al., 2008),
- Monitoring von Naturgefahren (z. Bsp. Hangrutschungen, Vulkanflanken und Gletscher) mit IBIS-L (TARCHI et al., 2003; NOFERINI et al., 2006),
- Schneehöhen und Lawinenüberwachung mit IBIS-L (MARTINEZ-VAZQUEZ und FORTUNY-GUASH, 2006).
- Erzeugung von Digitalen Geländemodellen (PIERACCINI et al., 2001; RÖDELSPERGER et al., 2010).

2.4 Vor- und Nachteile gegenüber traditionellen Instrumenten

Die Vor- und Nachteile von IBIS gegenüber anderen Messsystemen können wie folgt zusammengefasst werden

Vorteile

- Berührungsloses Messverfahren
- Simultane Beobachtung aller Zielpunkte in der Antennekeule (flächenhafte Erfassung der Struktur)
- Unabhängigkeit von Tageszeit und Wetter
- Hohe Genauigkeit und hohe räumliche Auflösung
- Hohes Automatisierungspotential

Nachteile

- Atmosphärische Refraktion
- Nur Messung der relativen Bewegungen in Blickrichtung
- Schwierige Punktzuordnung
- Reflektivität der Objektoberfläche bestimmt Messbarkeit und Genauigkeit

Das berührungslose Messverfahren ist ein Vorteil gegenüber vielen traditionellen Messsystemen wie beispielsweise Extensometer, Inklinometer und Beschleunigungssensoren. Die Kombination von hoher räumlicher Auflösung und hoher Genauigkeit ermöglicht die Analyse vieler Messpunkte entlang des Bauwerks. Mit punktuellen Messverfahren können oft nur wenige Sensoren eingesetzt werden und die Auswahl des Installationsortes ist somit

Tab. 1: IBIS-S und IBIS-L Spezifikationen.

| | IBIS-S | IBIS-L |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| Frequenz | 17,2 GHz | |
| Bandbreite | bis zu 200 MHz | |
| Entfernungsauflösung | bis zu 0,75 m | |
| Azimutauflösung | - | bis zu 4,4 mrad |
| Genauigkeit | 0,01 bis 0,1 mm | 0,1 bis 1 mm |
| Maximalentfernung | 1000 m | 4000 m |
| Messrate | bis zu 200 Hz | 5 bis 10 min |

entscheidend. Der Installationsaufwand ist meist hoch. Mit IBIS kann schnell und einfach ein Überblick über die vorhandene Situation gewonnen werden. Aufgrund der aktiven Messtechnik und des verwendeten Frequenzbereiches, kann die Messung unabhängig von Tageslicht und Wetter (z. Bsp. Nebel, Regen) durchgeführt werden. Der Einfluss der Atmosphäre auf die Messung wurde bereits in Kap. 2.1 dargestellt. Um Bewegungen zu bestimmen muss die Phasenmessung um die Refraktion korrigiert werden. Die Güte der atmosphärischen Korrektur bestimmt maßgeblich die erzielbare Genauigkeit der Bewegungsmessung. Bei Schwingungsmessungen mit IBIS-S mit hoher Messfrequenz und geringen Entfernungen zum Messobjekt kann die Refraktion vernachlässigt werden. Beim Langzeit-Monitoring von Bauwerken und Hangrutschungen mit IBIS-L jedoch kann die atmosphärische Laufzeitverzögerung je nach Wetterbedingungen einige mm pro km Entfernung in einem Zeitraum von 5 bis 10 min ausmachen. Eine Korrektur der Refraktion ist unabdingbar.

Wie bereits in Kap. 2.1 erläutert, können ausschließlich relative Bewegungen in Blickrichtung beobachtet werden. Ist der Betrag der Bewegung zwischen zwei Messungen größer als $\lambda/4$, so können diese Bewegungen nicht mehr korrekt bestimmt werden. Bei hochfrequenten Messungen mit IBIS-S spielt das Bestimmen der Mehrdeutigkeiten eine untergeordnete Rolle. Bei IBIS-L jedoch kann aufgrund größerer zeitlicher Abstände zwischen den Messungen sowie atmosphärischer Refraktion die Bestimmung der Mehrdeutigkeiten erheblich erschwert werden. Verschiedene Techniken wurden entwickelt (z. Bsp. Persistent Scatterers Technik) um die Mehrdeutigkeiten auch unter schwierigen Bedingungen zu bestimmen (FERRETTI et al., 2000; KAMPES, 2006). Dabei werden die Daten nicht mehr flächenhaft ausgewertet sondern die Zeitreihen ein-

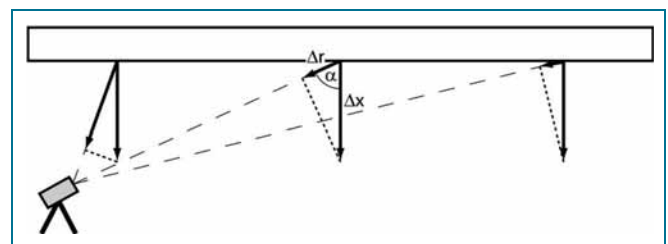


Abb. 3: Wahre und mit IBIS gemessene Bewegung in Blickrichtung.

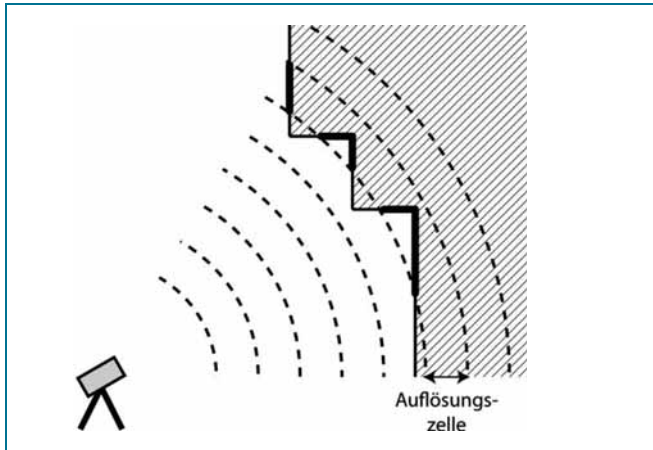


Abb. 4: Punktüberlagerungen im Fall von IBIS-S.

zelner gut reflektierender Punkte (Persistent Scatterers) betrachtet.

Die gemessenen Bewegungen sind eindimensionale Bewegungen (in Blickrichtung). Abb. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen wahrer Bewegung (hier vertikal) und der, auf die Blickrichtung projizierten (gemessenen) Bewegung anhand eines Beispiels. Der Standpunkt von IBIS muss entsprechend der zu erwartenden Bewegungsrichtung gewählt werden. Bei vielen Bauwerken kann diese anhand der Geometrie abgeschätzt werden (beispielsweise bei Brücken vertikal, bei Türmen horizontal). Die gemessenen Bewegungen in Blickrichtung Δr können dann auf die wahre Bewegungsrichtung Δx projiziert werden

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos \alpha}, \quad (9)$$

wobei α der Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Blickrichtung ist. Große Winkel sollten aufgrund des schleifenden Schnittes sowie der ungünstigen Fehlerfortpflanzung möglichst vermieden werden. Bei einem Winkel von 60° ist die Verstärkung um den Faktor 2, bei einem Winkel von 75° bereits um den Faktor 3,8. Auf der anderen Seite sind zu kleine Winkel ungünstig für das Auflösungsvermögen in Blickrichtung des Radars. IBIS ist nicht pauschal zur Messung von Bewegungen und Schwingungen aller Objekte geeignet. Entscheidend für Messbarkeit und die erreichbare Genauigkeit sind die Reflektivität sowie die Geometrie des Objektes. Die Geometrie spielt eine wichtige Rolle für die Interpretation der Messergebnisse. Mit IBIS-S können ausschließlich Punkte verschiedener Entfernung unterschieden werden. Bei IBIS-L kommt noch die Auflösung in Azimut dazu. Die Bewegungen von Punkten, die in eine Auflösungszelle fallen überlagern sich und können nicht voneinander

Tab. 2: Anwendungsbeispiele mit IBIS.

| Ort | Objekt | Ziel |
|---------|------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Neutsch | Windrad | Bestimmung von Eigenfrequenz, Eigenform und Drehzahl des Windrades (IBIS-S) |
| Mühltal | Brücke | Beobachtung von Belastungen der Brücke während des laufenden Betriebs (IBIS-S) |
| Dieburg | Steinbruch | Beobachtung von Rutschungsbewegungen im Steinbruch über 4 Tage (IBIS-L) |

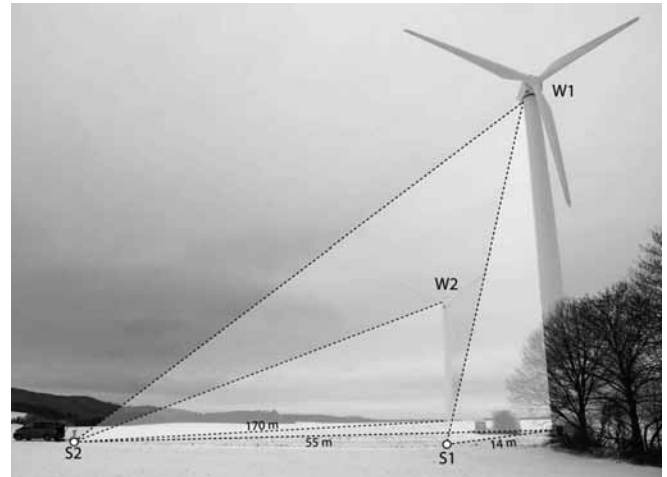


Abb. 5: Messkonzept zur Bestimmung der Eigenfrequenz der Windräder auf der Neutscher Höhe.

getrennt werden ohne Annahmen oder Zusatzinformationen (Abb. 4). Der Standpunkt und die Ausrichtung von IBIS muss so gewählt werden, dass Punktüberlagerungen möglichst vermieden werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es zur Interpretation der Messergebnisse essentiell ist, Kenntnisse über Mess- und Auswerteverfahren zu haben.

3 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden anhand von drei Beispielen mögliche Anwendungsgebiete von IBIS aufgezeigt. Tab. 2 gibt einen Überblick über die Beispiele.

3.1 Schwingungen von Windrädern (IBIS-S)

Schwingungsmessungen an Windenergieanlagen werden durchgeführt, um eine Übereinstimmung der Rotorfrequenzen mit den Eigenfrequenzen der Trägerstruktur, die zu gefährlichen Resonanzerscheinungen führen kann, zu vermeiden (VENNEGERTS und KUTTERER, 2007). Im Dezember 2009 wurden auf der Neutscher Höhe im Odenwald die dynamischen Eigenschaften zweier Windräder mit IBIS-S untersucht. Die Windräder gehören zur Odenwaldwind GmbH und haben eine Nabenhöhe von 50 m mit einem dreiblättrigen Rotor mit 43 m Durchmesser (ODENWALDWIND GmbH, 2010). Abb. 5 zeigt ein Foto der beiden Windräder sowie die gewählten Standpunkte für IBIS-S

In Tab. 3 sind die vier jeweils 10-minütigen Messkampagnen mit IBIS-S aufgeführt. Windrad W1 stand während der Messung still, während sich Windrad W2 mit

Tab. 3: Übersicht über die vier Messkampagnen.

| Nr | Standpunkt | Windrad | Entfernung d | Elevation α | Hauptkeule |
|----|------------|---------|----------------|--------------------|------------|
| 1 | S1 | W1 | 14 m | 55° | 15 – 27 m |
| 2 | S1 | W1 | 14 m | 60° | 18 – 34 m |
| 3 | S2 | W1 | 55 m | 35° | 29 – 50 m |
| 4 | S2 | W2 | 170 m | 10° | komplett |

etwa 18 Umdrehungen pro Minute drehte. Der Standpunkt muss entsprechend der Aufgabenstellung gewählt werden. Je größer die Entfernung zwischen Standpunkt und Windrad, desto geringer ist die Auflösung entlang des Mastes, da mit IBIS-S nur Entfernungen und keine Winkel aufgelöst werden können. Die Wahl der Ausrichtung der Antenne in Elevation spielt insbesondere bei kurzen Entfernungen eine Rolle, da dann nur ein Teil des Mastes innerhalb der Hauptkeule der Antenne liegt. An gut reflektierenden Punkten können allerdings auch außerhalb der Hauptkeule Messungen ausgewertet werden.

Für jede Messkampagne wurden die Zeitreihen der Bewegungen aller ausgewählten Punkte entlang des Mastes in die Horizontale projiziert und mit Hilfe einer Fourier Transformation in den Frequenzraum transformiert. Abb. 6 (links) zeigt exemplarisch die Frequenzanalyse der 2. Messkampagne in einer Masthöhe von 29 m. Für Windrad W1 lässt sich die Eigenfrequenz von 0,70 Hz als deutlicher Peak in allen Höhen und Kampagnen ermitteln. In Abb. 6 (rechts) ist die daraus bestimmte Eigenform entlang der Masthöhe aufgetragen.

Zum Vergleich zeigt Abb. 7 (links) die aus allen drei Messkampagnen bestimmte Eigenform von Windrad W1. Die Amplitude der Eigenform wurde normiert, da sie stark von den Windverhältnissen abhängt. Die bestimmten Eigenformen stimmen sehr gut überein.

Abb. 7 (rechts) zeigt das SNR der drei Messkampagnen von Windrad W1 entlang der Masthöhe. Wie zu erwarten, ist das SNR aufgrund des steileren Blickwinkels bei Kampagne 2 in Höhen über 20 m etwas stärker und unter 20 m etwas geringer gegenüber Kampagne 1. Das starke SNR aller Kampagnen in Höhe 50 m ist auf Höhe der Nabe, wo die Mikrowellen aufgrund der Geometrie besonders gut reflektiert werden.

Bei Kampagne 4 (Windrad W2) können aufgrund der großen Entfernung und des damit verbundenen geringen Entfernungsunterschiedes zwischen Turmbasis und Nabe (ca. 7 m) kaum Punkte entlang des Mastes unterschieden werden. Hier wird das Windrad als Ganzes betrachtet und die Bestimmung der Eigenform ist nicht möglich.

Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt der Zeitreihe der Bewegungen des Mastes von W2 sowie der Intensität der Rück-

SURVEYORS - EXPRESS™
 WWW.VERMESSEN.DE WWW.GPSGEO.COM

Lupinenweg 108, 61118 Bad Vilbel, Vermessungsinstrumente & Zubehör
 Landsurveying-Instruments & Equipment, Tel: ++496101 5413-54 Fax: -55




TOTAL STATIONS - THEODOLITE - LASERDISTANCEMETER - CONSTRUCTION-LASERS - LEVELS - SURVEYING EQUIPMENTS
 ...new and secondhand Total Stations on Stock.



- when it has to be right



Brandmarks: Sprinter™ - Baumeister™ - Swiss-Style-Level™ - Swiss-Style-Theo™

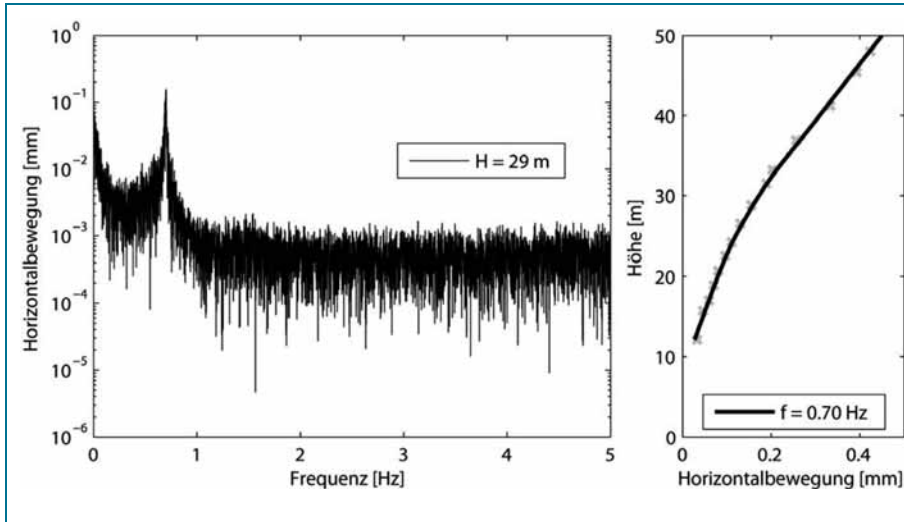


Abb. 6: Frequenzanalyse der, auf die Horizontale projizierten, Bewegungen in Höhe von 29 m an Windrad W1 (links) und die Eigenform bei einer Frequenz von 0,70 Hz (rechts).

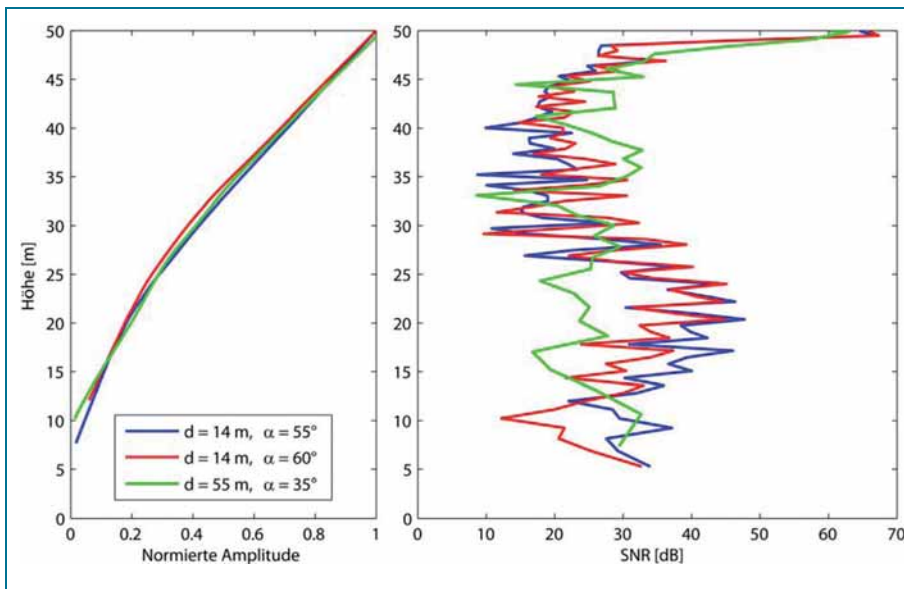


Abb. 7: Eigenform bei 0,70 Hz (links) und Signal-Rausch-Verhältnis (rechts) der drei Messungen an Windrad W1 aufgetragen entlang der Masthöhe.

streuung. In der Zeitreihe der Bewegung ist deutlich die Schwingung des Mastes zu erkennen. Aufgrund der Drehung des Rotors gibt es bei jedem Rotorblattdurchgang eine kurze Störung, die sich vor allem in der Intensität zeigt.

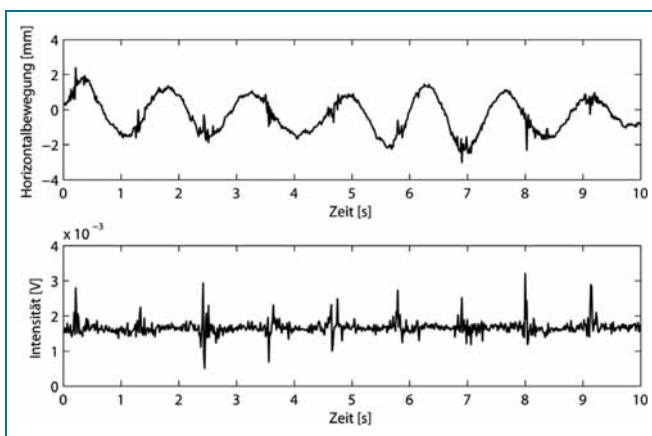


Abb. 8: Zeitreihe von Bewegung und Intensität von Windrad W2.

In Abb. 9 ist die Fourier Transformierte von Bewegung und Intensität gegen die Frequenz aufgetragen. Die Eigenfrequenz von 0,70 Hz kann aus der Frequenzanalyse der Bewegungen bestimmt werden. Ein weiterer Peak ist deutlich sichtbar bei einer Frequenz von 0,9 Hz (in Bewegung und Intensität). Die Rotationsgeschwindigkeit des Windrades beträgt ein Drittel dieser Frequenz (aufgrund von drei Rotorblättern). Die daraus bestimmte Drehzahl von 17,9 Umdrehungen pro Minute (0,3 Hz) konnte durch Videoaufnahmen bestätigt werden und weicht damit deutlich von der Eigenfrequenz der Windenergieanlage ab.

3.2 Belastungen einer Brücke (IBIS-S)

An einer Brücke am Lohbergtunnel in Nieder-Ramstadt (Abb. 10) wurde mit IBIS-S die Belastung während des normalen Betriebs beobachtet. IBIS-S wurde dabei unter der Brücke positioniert. Zusätzlich wurden Aufnahmen mit einer Webcam gemacht um besondere Ereignisse zu rekonstruieren.

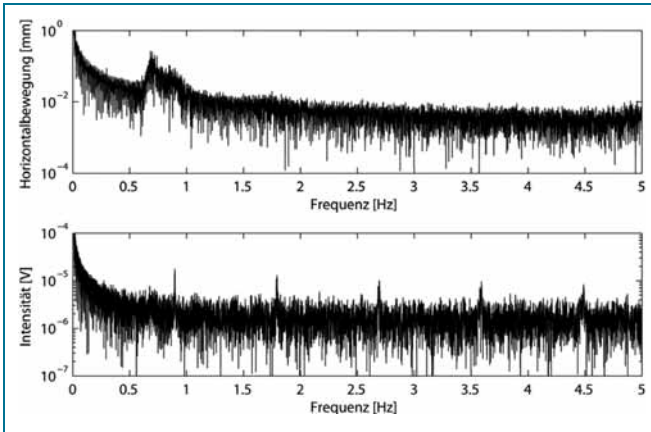


Abb. 9: Frequenzanalyse von Bewegung und Intensität von Windrad W2.



Abb. 10: Unterseite der beobachteten Brücke.

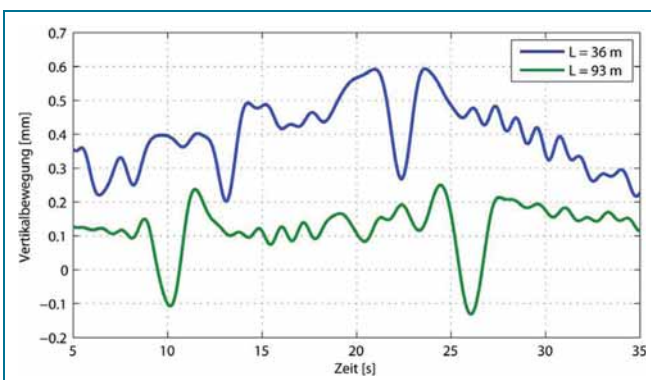


Abb. 11: Zeitreihe der Vertikalbewegung an zwei Punkten an der Brücke während der Überfahrt zweier LKWs (oben).

In Abb. 11 (oben) ist die Zeitreihe zweier Punkte bei 36 m (zwischen Pfeiler P1 und P2) sowie bei 93 m (hinter Pfeiler P3) zu sehen. Zwischen Sekunde 8 und 15 sowie 21 und 27 sind die Auslenkungen aufgrund der Überfahrt zweier LKWs in gegensätzlicher Richtung zu sehen. Anhand der Zeitdifferenz der Auslenkungsmaxima kann auf die Geschwindigkeiten geschlossen werden. Der erste LKW fährt mit einer Geschwindigkeit von ca. 68 km/h auf das Radar zu, der zweite LKW entfernt sich vom Radar mit einer Geschwindigkeit von ca. 56 km/h. Aus der Maximalauslenkung kann, bei bekannten Auflasten, auf Materialeigenschaften der Brücke geschlossen werden. Änderungen dieser Eigenschaften können auf Ermüdungserscheinungen hinweisen.

3.3 Monitoring eines Steinbruchs (IBIS-L)

In einem Steinbruch der Odenwälder Hartstein Industrie bei Dieburg wurden Bewegungen im Zeitraum von 28.7. bis 1.8.2008 mit IBIS-L beobachtet. Abb. 12 zeigt ein Foto und Intensitätsbild des Beobachtungsgebietes. Im Gegensatz zu IBIS-S können mit IBIS-L zweidimensionale Bilder erzeugt werden.

Aufgrund der geringeren Messfrequenz kann bei IBIS-L das Bestimmen der Phasenmehrdeutigkeiten Probleme verursachen. Während der Messung wurde im Steinbruch gearbeitet und umherfahrende Maschinen und Fahrzeuge können zu erheblichen Störungen in der Phasenmessung führen. Im Abbaugelände selbst können keine Massenbewegungen beobachtet werden, da die Abbaugeschwindigkeit die maximale beobachtbare Bewegung von $\lambda/4$ um ein Vielfaches übersteigt. Aus diesem Grund wurde ein Persistent Scatterer Verfahren zur Auswertung verwendet: Dabei wird nicht das gesamte Interferogramm (d.h. die Differenz zweier Phasenbilder) sondern Zeitreihen einzelner selektierter Punkte betrachtet. Die Refraktion wurde gemäß (5) aus den Zeitreihen der Bewegungen stabiler Punkte geschätzt.

Abb. 13 zeigt die, über den gesamten Zeitraum aufsummierten und korrigierten, Bewegungen in Blickrichtung des Geräts. Zeitreihen der drei markierten Punkte sind in Abb. 14 dargestellt. Punkt 300 ist ein spezieller Radarreflektor, der während der Messung an einem stabilen Teil des Hanges angebracht war. Punkt 100 und 200 befinden sich am Schotterhügel. Am Gipfel Hügels ist die Bewegung vom Gerät weg gerichtet, am Fuß zum Gerät hin, d.h. Material vom Gipfel hat sich am Fuß des Hügels angelagert. Die Hauptbewegung hat während heftigen Regens stattgefunden.

4 Diskussion und Ausblick

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Beispiele, zeigen die Möglichkeiten der Mikrowelleninterferometrie und von IBIS, das auf diesen Grundlagen arbeitet, auf. Mit IBIS-S und IBIS-L steht ein Messgerät zur Verfügung, dass die Erfassung von Bewegungen von Strukturen mit hoher räumlicher Auflösung in einem weiten Frequenzbereich von quasi statischen Deformationen bis hin zu 100 Hz mit sehr hoher Genauigkeit erlaubt.

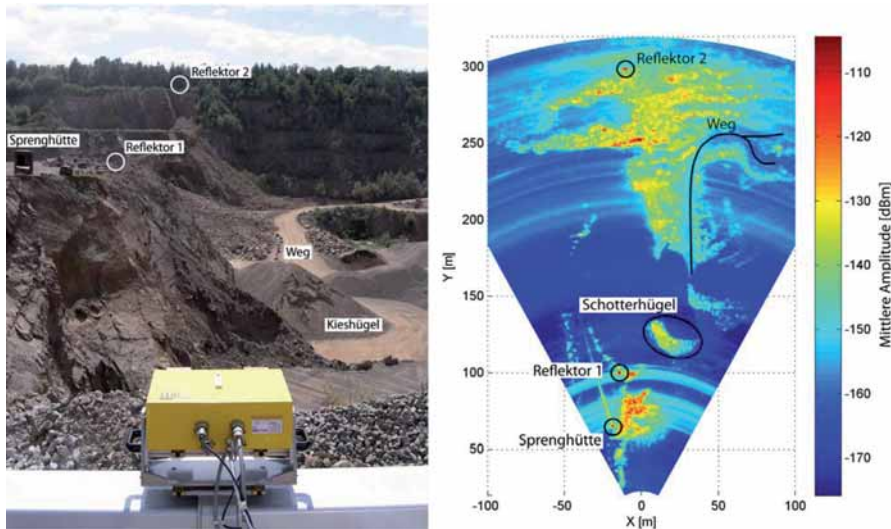


Abb. 12: Foto (links) und Intensitätsbild (rechts) der Messung im Steinbruch. Zum besseren Überblick wurden markante Objekte in beiden Bildern markiert.

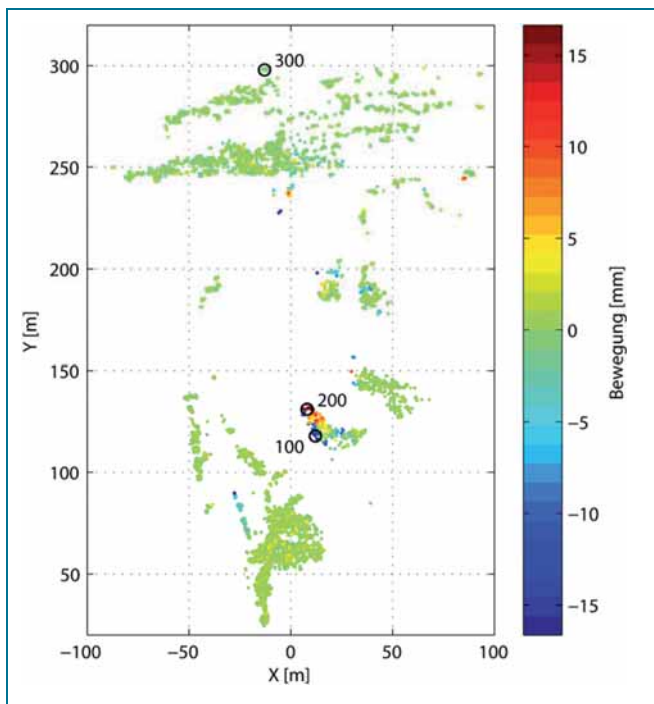


Abb. 13: Aufsummierte Bewegung im Steinbruch Dieburg. Zeitreihen der markierten Punkte sind in Abb. 14 dargestellt.

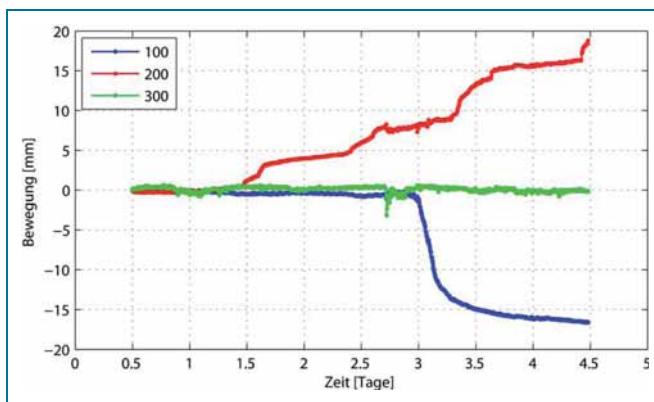


Abb. 14: Zeitreihen der beobachteten Bewegung an drei ausgewählten Punkten im Steinbruch Dieburg.

Beispiel 1 und 2 zeigen die Anwendungsmöglichkeiten von IBIS-S im Bereich der dynamischen Bauwerksüberwachung. Gegenüber traditioneller Instrumentierung ist der Messaufwand wesentlich erleichtert, da das Gerät innerhalb weniger Minuten einsatzbereit ist. Die Wahl des Gerätestandpunktes spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität und Auswertbarkeit der Messung. Er ist im Wesentlichen von Geometrie und Material des Objektes abhängig.

Beispiel 3 zeigt die Anwendungsmöglichkeiten von IBIS-L im Bereich der Überwachung von Hangrutschungen. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Überwachungsmethoden, ist hohe räumliche und zeitliche Auflösung. So können auch komplexe Rutschungsvorgänge erfasst und analysiert werden. Es kann unter allen Witterungsbedingungen eingesetzt werden. Regen, Schnee und hoher Feuchtegehalt in der Atmosphäre bewirken allerdings einen erhöhten Rauschpegel des Messsignals. Aufgrund der Mehrdeutigkeit der Phasemessung ist der Einsatz des Gerätes limitiert auf Rutschungsvorgänge mit Geschwindigkeiten $< 0,5$ m/Tag. Durch Einsatz von zusätzlichem Instrumentarium (z. Bsp. Reflektoren mit GPS ausgestattet) können unter Umständen auch höhere Geschwindigkeiten beobachtet werden.

Die Interpretation der Messergebnisse von IBIS kann durch die Verknüpfung der Messergebnisse mit Finite Elemente (FE) Modellrechnungen deutlich verbessert werden. Eine Kombination von FE-Berechnungen mit der Automatisierung der Datenübertragung und der Auswertung können IBIS zu einem wichtigen Messinstrument im Bereich der Ingenieurvermessung und des Bauwesens (Massivbau, Geotechnik) sowie im Bereich der Geowissenschaften machen.

Die Möglichkeiten, IBIS für Überwachungsmessungen einzusetzen, sind bisher noch nicht erschöpfend untersucht. Zusätzlich fehlen bis heute Untersuchungen bezüglich der instrumentell bedingten Fehler des Messgerätes (Phasenlage, Frequenz). Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit anderen flächenhaft arbeitenden Messsystemen mit ähnlich hoher Genauigkeit wie terrestrische Laserscanner müssen die Qualität der Messergebnisse bestätigen.

5 Danksagung

IBIS-L wurde im Rahmen des Projektes Exupéry, gefördert vom Geotechnologien Programm des BMBF (Fördernummer 03G0646C), beschafft.

6 Literatur

- [1] ALBA, M.; BERNADINI, G.; GIUSSANI, A.; RICCI, P.; RONCORONI, F.; SCAIONI, M.; VALGOI, P.; ZHANG, K. (2008): Measurement of Dam Deformations by Terrestrial Interferometric Techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1, 3–11 July 2008, Beijing, China.
- [2] BERNADINI, G.; De PASQUALE, G.; BICCI, A.; MARRA, M.; COPPI, F.; RICCI, P.; PIERACCINI, M. (2007): Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 24–26 October 2007, Porto, Portugal.
- [3] FARRAR, C.; DARLING, T.; MIGLIORI, A.; BAKER, W. (1999): Microwave interferometers for non-contact vibration measurements on large structures, *Mechanical Systems and Signal Processing* 13: 241–254.
- [4] FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38: 2202–2212.
- [5] GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A. (1989): Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research* 94 (B7): 9183–9191.
- [6] GENTILE, C.; BERNARDINI, G. (2009): An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. *Structure and Infrastructure Engineering* 99999: 1–14.
- [7] HANSSEN, R. (2002): *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Plenum Publishing Corporation.
- [8] HARRIS, N.; NOON, D.; ROWLEY, K. (2006): Case Study of Slope Stability Radar used in Open Cut Mines, in: *Proc. of Int. Symp. on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Eng.*, Cape Town, South Africa, Apr 3–6, 2006.
- [9] HOVANESSIAN, S. A. (1980): *Introduction to Synthetic Array and Imaging Radar*. Artech House, Dedham, MA.
- [10] JUST, D.; BAMLER, R. (1994): Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. *Applied Optics* 33: 4361–4368.
- [11] KAMPES, M. (2006): *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Vol. 12. Springer.
- [12] KRAMER, H. J. (2002), *Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Springer, Berlin.
- [13] LUZI, G.; PIERACCINI, M.; MECATTI, D.; NOFERINI, L.; GUIDI, G.; MOIA, F.; ATZENI, C. (2004): Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42: 2454–2466.
- [14] MARTINEZ-VAZQUEZ, A.; FORTUNY-GUASH, J. (2006): Snow Cover Monitoring in the Swiss Alps with a GB-SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter March 2006*: 11–14.
- [15] MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 36 (4): 441–500.
- [16] NOFERINI, L.; PIERACCINI, M.; MECATTI, D.; MACALUSO, G.; LUZI, G.; ATZENI, C. (2006): Long term landslide monitoring by ground-based synthetic aperture radar interferometer. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1893–1905.
- [17] Odenwaldwind GmbH (2010): <http://www.odenwaldwind.de>.
- [18] PIERACCINI, M.; LUZI, G.; ATZENI, C. (2001): Terrain Mapping by Ground-Based Interferometric Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39.
- [19] PIERACCINI, M.; FRATINI, M.; PARRINI, F.; PINELLI, G.; ATZENI, C. (2005): Dynamic survey of architectural heritage by high-speed microwave interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 2: 28–30.
- [20] RÖDELSPERGER, S.; BECKER, M.; GERSTENECKER, C.; LÄUFER, G.; SCHILLING, K.; STEINECK, D. (2010): Digital elevation model with the groundbased SAR IBIS-L as basis for volcanic deformation monitoring. *Journal of Geodynamics* 49: 241–246.
- [21] SMITH, E. K.; WEINTRAUB S. (1953): The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 41 (8): 1053–1037.
- [22] TARCHI, D.; CASAGLI, N.; FANTI, R.; LEVA, D.; LUZI, G.; PASUTO, A.; PIERACCINI, M.; SILVANO, S. (2003): Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering Geology* 68: 15–30.
- [23] TAYLOR J. D. (2001): *Ultra-wideband radar technology*. CRC Press.
- [24] VENNEGEERTS, H.; KUTTERER, H. (2007): Analyse der Bewegung von Windenergieanlagen aus dem Vergleich zweier Aufnahmeverfahren terrestrischer Laserscanner. In F. Brunner (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2007, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, 2007, Heidelberg*.
- [25] ZEBKER, H. A.; GOLDSTEIN, R. M. (1986): Topographic Mapping Derived from Synthetic Aperture Radar Measurements. *Journal of Geophysical Research* 91: 4993–4999.
- [26] ZEBKER, H.; ROSEN, P.; HENSLEY, S. (1997): Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research* 102: 7547–7563.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. SABINE RÖDELSPERGER,
 Dr.-Ing. GWENDOLYN LÄUFER,
 Prof. Dr.-Ing. CARL GERSTENECKER,
 Prof. Dr.-Ing. MATTHIAS BECKER
 Institut für Physikalische Geodäsie, TU Darmstadt
 Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt
 E-Mail: roedelsperger@geod.tu-darmstadt.de