

Erfassung von hochfrequenten und langfristigen Deformationsprozessen mit terrestrischer Mikrowelleninterferometrie



Matthias Becker, Sabine Rödelsperger, Gwendolyn Läufer, Jens Schneider, Darmstadt

Kurzfassung

In den letzten 10 Jahren hat sich die terrestrische Mikrowelleninterferometrie zu einem wichtigen Instrument bei der Beobachtung von Massenbewegungen und Bauwerken entwickelt. Das Messverfahren ermöglicht sowohl das wiederholte Erfassen von langfristigen Deformationen flächenhafter Objekte (2D), als auch die Bestimmung von hochfrequenten Bewegungen eines Profils (1D).

Dieser Vortrag stellt die technischen und physikalischen Grundlagen des Mess- und Auswerteverfahrens dar und zeigt drei Anwendungsbeispiele. Die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technik sind vielfältig und reichen von der Bestimmung von modalen Parametern (Eigenfrequenz, Eigenform, Dämpfung) von Bauwerken wie Brücken und Türmen bis hin zu Monitoring von Bewegungen im Bergbau, an Hangrutschungen, Gletschern, Vulkanen und Staudämmen. Die wesentlichen Vorteile der Technik gegenüber herkömmlichen Verfahren sind das berührungslose Messen (d.h. kein Zugang zum Objekt ist erforderlich), sowie die Unabhängigkeit von Tageslicht und Wetterverhältnissen.

Schlüsselwörter: Mikrowelleninterferometrie, bodengestütztes SAR, IBIS, GeoMonitoring

Abstract

Terrestrial microwave interferometry has become an important instrument for displacement monitoring in the past ten years.

Here, the principles of the microwave interferometer IBIS (Image by Interferometric Survey) are presented, as well as its advantages and disadvantages compared to common monitoring techniques. IBIS can be operated in two modes: IBIS-S is a microwave interferometer capable of high frequency displacement monitoring of buildings and structures (up to 200 Hz); IBIS-L is a ground-based SAR for long-term displacement monitoring of buildings and natural phenomena as landslides, glaciers, etc.

Exemplary three applications are presented, to show the achievable accuracies and resolution, as well as the variety of possible applications of this technology.

Keywords: Displacement monitoring, microwave interferometry, ground-based Synthetic Aperture Radar, IBIS.

1. Einleitung

Das terrestrische SAR Instrument IBIS (Image by Interferometric Survey) der Firma IDS (Pisa, Italien) ermöglicht die Fernerkundung eines Objektes bis zu einer Distanz von 4 km, indem es Mikrowellen mit einer Frequenz von 17.2 GHz aussendet und die reflektierten Echos empfängt (Bernadini et al., 2007 [1]). IBIS kann in zwei Versionen betrieben werden. IBIS-S liefert Amplituden und Phasenmessungen von Auflösungszellen entlang eines Profils einer Struktur, d.h. es können Bereiche mit verschiedenen Entfernungen voneinander unterschieden werden. Diese Entfernungsauflösung wird durch die sog. SFCW-Technik (Stepped Frequency Continuous Wave) erreicht. Mit einer maximalen Messrate von 200 Hz sind die wesentlichen Anwendungsgebiete

dieser Messtechnik die Aufzeichnung von Deformationen und Schwingungen von Bauwerken sowie die Bestimmung ihrer modalen Parameter (Eigenfrequenzen, Eigenmoden und Dämpfung). Die maximal erreichbare Genauigkeit liegt unter optimalen Bedingungen bei 0.01 mm.

IBIS-L ist ein bodengestütztes Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Das Ergebnis einer Aufnahme mit IBIS-L ist ein zwei-dimensionales Bild mit Entfernungs- und Azimutauflösung. Alle 5 bis 10 Minuten wird ein zweidimensionales Amplituden- und Phasen-Bild generiert, mit einer Auflösung von 0.75 m in Entfernung und 4.4 mrad in Azimut (4.4 m in 1 km Entfernung). Die Technik zur Entfernungsauflösung entspricht der Technik bei IBIS-S. Zusätzlich dazu wird der Sensor entlang einer Schiene bewegt wodurch

eine künstliche Vergrößerung der Antenne (i.e. synthetische Apertur) bewirkt wird. Einsatzgebiet dieser Geräteversion ist im Wesentlichen die Deformationsüberwachung von flächenhaften Objekten wie Staudämme, Hangrutschungen, Gletscher und Vulkane sowie Schneehöhen- und Lawinenüberwachung (siehe auch Rödelsperger et al., 2010 [2]).

2. Mikrowelleninterferometrie

2.1 Grundprinzip

Mikrowellen werden ausgesendet und im Messgebiet reflektiert. Gemessen werden Amplitude und Phase des reflektierten Signals. Die Amplitude ist abhängig von der Intensität der Rückstreuung, Kanten, Ecken und Felsen reflektieren gut, Vegetation oder Sandboden nur gering.

Die gemessene Phase φ^w ist abhängig von der Strecke r zwischen Instrument und Objekt:

$$\varphi^w = W \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} r \right\},$$

wobei W für den Wrapping Operator steht und λ für die Wellenlänge. Da nur das Phasenreststück messbar ist und nicht die ganzzahlige Anzahl von Wellendurchläufen, liegt φ^w immer zwischen $-\pi$ und $+\pi$. Wird die Differenz zweier Phasenmessungen, i.e. die interferometrische Phase ϕ^w , gebildet, kann aus den Phasenänderungen auf Streckenänderungen geschlossen werden:

$$\phi^w = W \{ \varphi_1 - \varphi_2 \} = W \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) \right\}.$$

Auch die interferometrische Phase liegt zwischen $-\pi$ und $+\pi$ und ist eine Summe mehrerer Komponenten:

$$\phi^w = -\frac{\lambda}{4\pi} d + \phi_{atm} + \phi_{noise} - 2\pi n,$$

hierbei ist d die geometrische Streckenänderung zwischen Instrument und Objekt, ϕ_{atm} die atmosphärisch bedingte Phasendifferenz, ϕ_{noise} das Rauschen und n die Phasenmehrdeutigkeit, da nur das Phasenreststück bestimmbar ist. Übersteigt die Bewegung zwischen zwei Messungen ein Viertel der Wellenlänge, kann sie nicht eindeutig erkannt werden, da keine absoluten Entfernungen bestimmt werden, direkt können nur Verschiebungen kleiner als d_{max} gemessen werden:

$$|d_{max}| = \pm \frac{\lambda}{4}.$$

Zur Auflösung von Deformationszeitreihen aus mehreren Bildern und Zeitreihen werden die

aus der satellitengestützten Radarinterferometrie bekannten Verfahren der „Persistent Scatterer“ (PS) eingesetzt (Ferretti et al., 2001 [3]; Kampes, 2006 [4]).

2.2 Vor- und Nachteile des Mikrowellenverfahrens

Das berührungslose Messverfahren stellt einen großen Vorteil gegenüber vielen traditionellen Messsystemen, wie beispielsweise Extensometer, Inklinometer und Beschleunigungssensoren, dar. Die Kombination von hoher räumlicher Auflösung und hoher Genauigkeit ermöglicht zudem die gleichzeitige Analyse vieler Messpunkte. Bei punktuellen Messverfahren können oft nur wenige Sensoren eingesetzt werden und der Installationsaufwand ist meist hoch. Mit IBIS kann die Messung eines gesamten Objekts relativ schnell und einfach durchgeführt werden, ohne das Objekt betreten oder für den eventuell vorhandenen Verkehr sperren zu müssen. Aufgrund der aktiven Messtechnik und des verwendeten Frequenzbereiches, können die Messungen unabhängig von Tageslicht und Wetter (z. B. Nebel, Regen) durchgeführt werden.

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

Vorteile

- Berührungsloses Messverfahren, d.h. es ist kein Zugang zum Objekt erforderlich, die Eigenschaften des Objekts werden nicht durch Aufbringen von Messfühlern verändert, bei Naturgefahren muss das gefährdete Gelände nicht betreten werden,
- Simultane Beobachtung aller Auflösungszellen (gleicher Zeitstempel), nicht wie z.B. beim Laserscanner nacheinander,
- Unabhängigkeit von Tageszeit und Wetter, da mit Mikrowellen sowohl in Dunkelheit als auch bei Nebel, Regen oder Schnee gemessen werden kann,
- Hohe Genauigkeit (bis zu 0.01 mm) und hohe räumliche Auflösung (bis zu 0.75 m in Blickrichtung).

Nachteile

- Atmosphärische Refraktion (insbesondere Feuchteänderungen spielen bei Mikrowellen eine Rolle) ist eine signifikante Fehlerquelle,
- Messung relativer Bewegungen in Blickrichtung, d.h. nur eine Komponente des dreidimensionalen Bewegungsvektors wird ge-

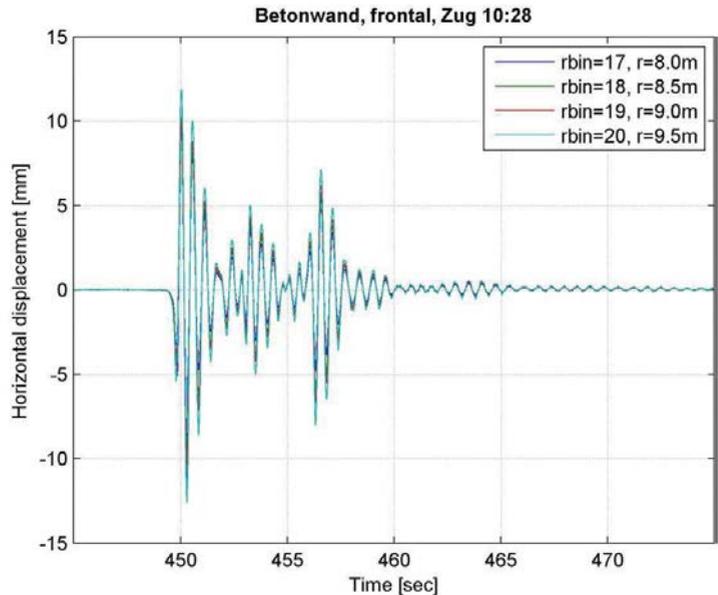


Abb. 1: Messung einer Beton-Schallschutzwand mit IBIS-S; Messaufbau (links); Bewegung von vier Punkten an der Wand während der Durchfahrt eines Zuges (rechts). Mit rbin ist die geräte-interne Punktnummer angegeben; r gibt die Schrägentfernung der Punkte zum Sensor an (je größer r, desto höher liegt der Punkt an der Wand).

messen und es werden keine absoluten Entfernungen gemessen,

- Teilweise schwierige Punktzuordnung, da es aufgrund des Messkonzeptes bei der Entfernungsauflösung zu Punktüberlagerungen kommen kann,
- Reflektivität der Objektoberfläche bestimmt Messbarkeit und Genauigkeit.

In den folgenden Abschnitten werden die Anwendungsmöglichkeiten des Messverfahrens anhand dreier Beispiele exemplarisch aufgezeigt.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Schwingung einer Lärmschutzwand (IBIS-S)

Das erste Beispiel zeigt den Einsatz von IBIS-S zur Messung und Analyse des Verhaltens von Schallschutzwänden entlang von Zugstrecken. Die hier gezeigten Messwerte wurden im Januar 2011 an der ICE-Strecke Frankfurt-Köln gemessen.

Abbildung 1 zeigt links das Foto einer Beton-Schallschutzwand mit dem IBIS-Standpunkt frontal davor und rechts die Zeitreihen von vier Punkten auf einem vertikalen Profil der Schallschutzwand.

Der vorbeifahrende ICE bestand aus zwei Zugteilen. Die Maximalausschläge werden jeweils bei Zuganfang, -ende und zwischen den Zugteilen aufgrund der Druck- und Sogwellen erreicht. Der maximale horizontale Ausschlag betrug in diesem Fall mehr als 10 mm. In Abbildung 2 ist die Frequenzanalyse der Schwingung eines Punktes am oberen Rand der Schallschutzwand dargestellt.

3.2 Modalanalyse einer Fußgängerbrücke (IBIS-S)

Das „Chamalimaud Centre for the Unknown“ befindet sich in Lissabon, Portugal. Benannt nach einem portugiesischen Arzt und Forscher,

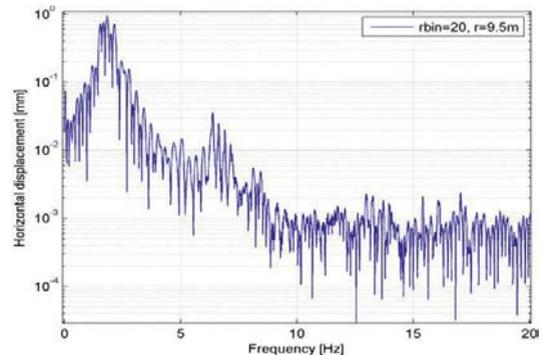


Abb. 2: Frequenzanalyse der Schwingung des Punktes am oberen Rand der Schallschutzwand in Abbildung 1



Abb. 3: Die Glasbrücke zur Verbindung von zwei Gebäudeteilen im Champalimaud Centre for the Unknown, Lissabon (Architekt: Charles Correa, Tragwerksplanung: Schlaich Bergermann und Partner)

der sein Vermögen nach seinem Tod der Champalimaud Foundation hinterließ, bietet es Räumlichkeiten zur klinischen Forschung. Es besteht aus zwei Gebäuden, welche durch eine 21 m lange Fußgängerbrücke verbunden sind (siehe Abbildung 3). Das Primärtragwerk der Brücke, ein unterspannter Einfeldträger, wird durch eine filigrane Stahlkonstruktion gebildet, die zugleich als Unterkonstruktion für die Hülle aus gebogenen Glasscheiben dient. Die Brücke wurde im Herbst 2010 fertig gestellt.

Zur rechnerischen Beurteilung der Schwingungsanfälligkeit der Brücke bei Anregung durch die querenden Fußgänger wurden mit Hilfe einer dynamischen Analyse am räumlichen Gesamtmodell der Brücke mit der Methode der Finiten Elemente die Eigenfrequenzen bestimmt (Abbildung 4). Mit der ersten Eigenfrequenz von 1.2 Hz liegt die Brücke zwar theoretisch im kritischen Bereich, praktisch wird auf Grund der

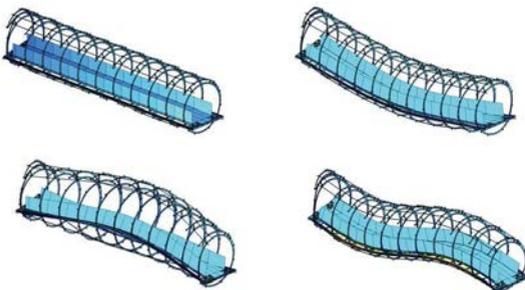


Abb. 4: Eigenformen und Eigenfrequenzen der Brücke, ermittelt am räumlichen Gesamtmodell mit der Methode der Finiten Elemente: (a) System; (b) 1. Eigenform 1.20Hz; (c) 2. Eigenform 1.42Hz (Torsion); (d) 3. Eigenform 1.71Hz

guten Dämpfungseigenschaften ein schnelles Abklingen erwartet.

Zur experimentellen Validierung der Eigenfrequenzen wurde die Brücke durch unterschiedliche Aktivitäten angeregt (Gehen, Laufen, Springen) und die dabei auftretenden Vertikalbewegungen wurden mit IBIS-S beobachtet. Das Gerät wurde dazu unter der Brücke aufgestellt, Blickrichtung schräg entlang der Brücke. Mikrowellen penetrieren Glas nicht, daher wurde die Oberfläche der Glaskonstruktion angemessen. In Abbildung 5 sind beispielhaft Zeitreihen für zwei Punkte im Abstand von 10.5 und 14.9 m vom Brückenanfang gezeigt. Deutlich erkennbar ist die hier durch Springen im Zeitraum 179 s bis 184 s und 193 s bis 200 s entstandene Anregung.

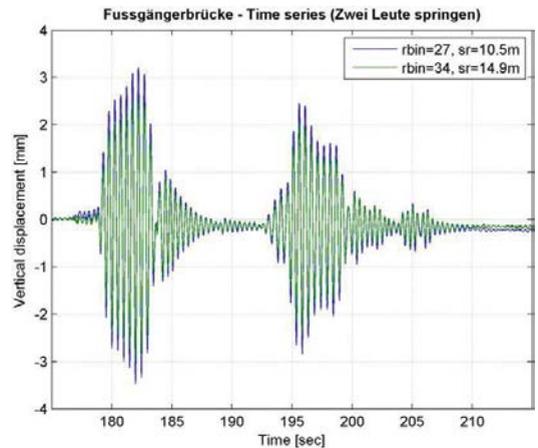


Abb. 5: Zeitreihe der Schwingungen zweier Punkte verursacht durch Springen von zwei Personen auf der Fußgängerbrücke. *rbin* ist die geräte-interne Punktnummer, *sr* gibt den horizontalen Abstand der Punkte zum Anfang der Brücke an.

Um den direkten Einfluss der Anregung selbst auszuschließen wurden zur Schätzung von Eigenfrequenz, Eigenform und Dämpfung die Zeiträume des Ausschlagens nach der Anregung verwendet. Aufgrund der großen Dämpfung beträgt der Zeitraum des Ausschlagens nur wenige Sekunden. Die Analyse ergab für die erste Eigenfrequenz einen Wert von 2.4 Hz (siehe Abbildung 6).

Beim Vergleich mit den rechnerischen Analysen (1. Eigenfrequenz bei nur 1.2 Hz) muss berücksichtigt werden, dass in diesen Analysen die Steifigkeit der Glashülle vernachlässigt wurde, da die Gläser statisch so gelagert sind, dass sie nur ausfachend wirken damit zum Einen die Eigenfrequenzen erhöhen und zum Anderen nicht für die Bemessung des Brückentragwer-

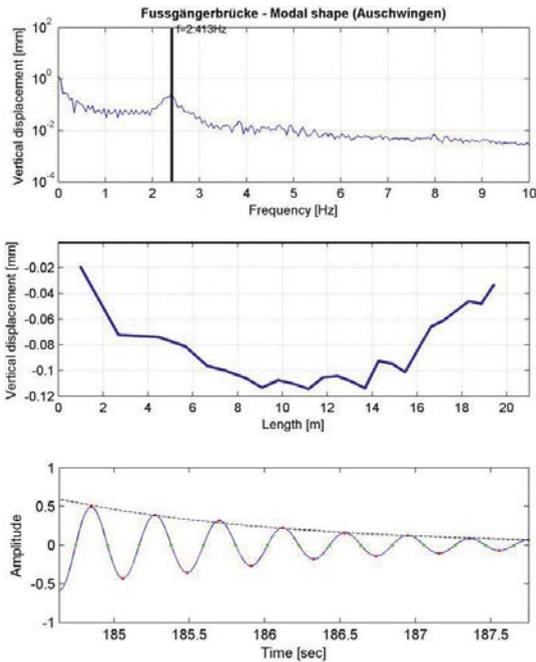


Abb. 6: Frequenzanalyse (oben), Eigenform der Brücke bei Frequenz 2.4 Hz (Mitte) und Schätzung der Dämpfung bei Frequenz 2.4 Hz (unten)

kes herangezogen werden können. Eine zweite dynamische Analyse mit Berücksichtigung der Dehn- und Biegesteifigkeit des Glases als voll aussteifendes Element ergab einen Wert von 5 bis 6 Hz für die erste Eigenform. Die tatsächlichen mit IBIS bestimmten Eigenfrequenzen liegen in der Mitte der beiden Modellrechnungen. Sie bestätigen die Annahmen zur Dämpfung und zeigen die Defizite der Modellannahmen der dynamischen Modellierung.

Zur Schätzung der Dämpfung aus den Messungen wurden die Extrempunkte der Zeitreihe des Ausschwingens bei der Frequenz von 2.4 Hz bestimmt (siehe Abbildung 6). Anschließend wurde die Abklingkonstante geschätzt. Der Dämpfungsgrad beträgt 4.6 %.

In einem weiteren Schritt wurden aus den Messungen die auftretenden Vertikalbeschleunigungen abgeleitet. Dabei ergab sich ein mittlerer Wert von 0.03 m/s^2 während des Gehens einer Gruppe und von 0.15 m/s^2 während des Rennens einer Gruppe von 12 Personen. Die maximale Vertikalbeschleunigung, die für Menschen bei Brückentragwerken noch behaglich ist, liegt bei etwa $0.7 - 1.0 \text{ m/s}^2$ (je nach Norm). Diese Werte wurden nur sehr kurzzeitig beim Rennen überschritten.

3.3 Hangrutschung Steinlehnen (IBIS-L)

Im Sommer 2010 und Sommer 2011 wurde die Hangrutschung Steinlehnen in Österreich jeweils einen Monat lang kontinuierlich mit IBIS-L beobachtet. Das Gerät wurde in einer Schutzhütte aufgebaut, in welcher zusätzlich meteorologische Sensoren und eine Webcam installiert wurden.

In Abbildung 7 sind die meteorologischen Messungen des Sommers 2010 dargestellt. Die Beobachtungen begannen bei sonnigem Wetter mit Temperaturen um 30°C . Ab Tag 4 fing es an zu regnen und die Hangrutschung lag hinter Wolken. An Tag 11 fiel die Temperatur auf 0°C ab und der Regen wurde zu Schnee, für wenige Stunden war die Hangrutschung mit Schnee bedeckt, welcher jedoch am selben Tag wieder schmolz.

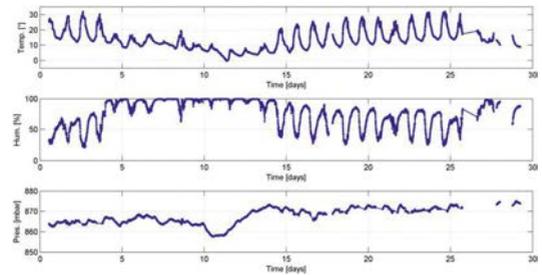


Abb. 7: Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck, gemessen im 09. Juni bis 08. Juli 2010 in Steinlehnen, Österreich

In Abbildung 8 sind die kumulierten Verschiebungen beider Kampagnen dargestellt. Negative Verschiebungen bedeuten eine Bewegung in Richtung des Radar-Sensors. Aus Tachymetrie-Messungen wurde als reale Bewegung ein Abrutschen talwärts entlang des Hanges ermittelt. Dies entspricht in etwa der Blickrichtung des Radars. Die aktive Zone ist durch eine signifikant höhere Bewegungsrate deutlich zu erkennen. Die maximalen Verschiebungen betragen im Sommer 2010 mehr als 0.12 m in Richtung des Radars. Das Unwrapping wurde mit dem von Sabine Rödelsperger entwickelten SePSi-Algorithmus (Rödelsperger, 2011 [5]) durchgeführt.

Während der Messperiode 2011 fanden wesentlich mehr Steinschläge statt als in 2010. Diese sprunghaften Bewegungen, die über d_{max} hinausgehen und in der Phasenmessung nicht eindeutig erfasst werden können, äußern sich als Rauschen. Dies ist im oberen und im unteren Bereich der Hangrutschung deutlich im rechten Bild in Abbildung 8 zu erkennen. Die dort abgebildeten Bewegungen können nicht als Ver-

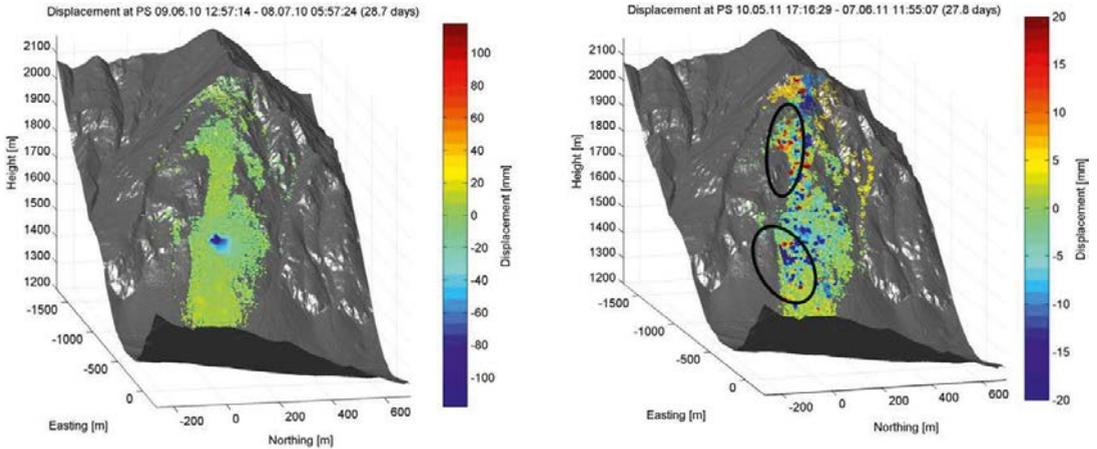


Abb. 8: Mit IBIS-L gemessene Verschiebungen an der Hangrutschung Steinlehen, Österreich, beobachtet zwischen 09.06.2010 und 08.07.2010 (links) sowie zwischen 10.05.2011 und 07.06.2011 (rechts). Die schwarzen Ovale in der rechten Abbildung markieren Gebiete höheren Rauschens auf Grund von Steinschlägen.

schiebungen interpretiert werden. In dem 2010 aktiven Bereich der Hangrutschung fanden sich auch 2011 wieder Verschiebungen, allerdings lagen sie bei maximal 20 mm innerhalb der Messperiode.

Der Zusammenhang von Wetter und Hangrutschung zeigt sich in der Zeitreihe von fünf ausgesuchten Persistent Scatterer (über einen längeren Zeitraum stabile Rückstreuer) im Sommer 2010 (Abbildung 9). Die größte Beschleunigung tritt am Tag 11 auf als nach einigen Tagen starken Regens die Temperaturen unter 0°C fielen. Vier Tage später geht die Verschiebungsrate auf fast Null zurück.

Steinschläge lassen sich in den Interferogrammen als Zonen erhöhten Rauschens leicht erkennen und genau lokalisieren (siehe Abbildung 10). Es konnte ein deutlicher Anstieg von Steinschlägen während aktiver Zeiten der Hangrut-

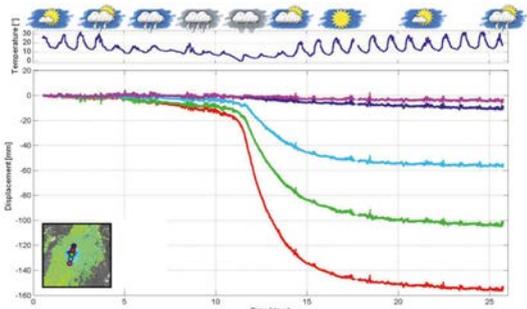


Abb. 9: Zeitreihen von fünf Persistent Scatterer (PS) während des Sommers 2010. Die Positionen der fünf PS sind in der linken unteren Ecke dargestellt. Oben sind Wetterbedingungen und die gemessene Temperatur aufgetragen.

schung verzeichnet werden. Ebenso gibt es ein erhöhtes Steinschlag-Aufkommen während starker Regenphasen. In Abbildung 11 sind die Steinschläge sowie der niedergegangene Regen während der Messperiode 2011 gegenüberge-

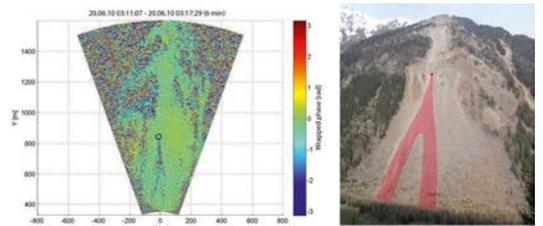


Abb. 10: Lokalisierung eines Steinschlags im Interferogramm (links) und im Foto (rechts) der Hangrutschung Steinlehen, Österreich. In rot ist die vom Steinschlag betroffene Zone dargestellt.

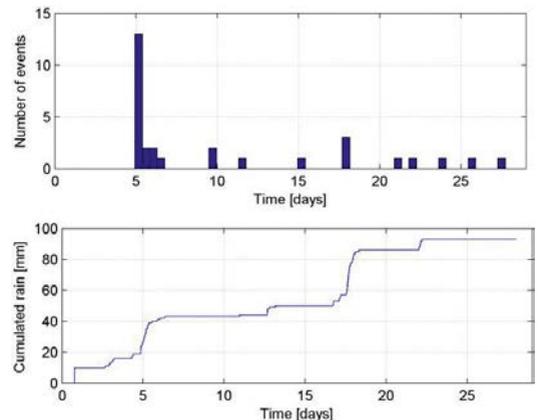


Abb. 11: Anzahl der aufgetretenen Steinschläge (oben) und kumulierte Regenmenge (unten) während der Messperiode 2011

stellt. An Tag 5 und Tag 17 fand ein Niederschlag von mehr als 20mm/Tag statt.

4. Fazit

Dieser Beitrag zeigt einige Anwendungsmöglichkeiten der Mikrowelleninterferometrie zur Bestimmung von Schwingungen an Bauwerken und zur Überwachung von Massenbewegungen. Die Vor- und Nachteile gegenüber traditionellen Messverfahren und das enorme Potential von kontinuierlichen Multi-Parameter Überwachungsmessungen wurden dargestellt. Die wesentlichen Vorteile liegen im berührungslosen Verfahren, der hohen Genauigkeit und der erreichbaren Auflösung. Ein limitierender Faktor ist die atmosphärische Refraktion, die vor allem bei Überwachungsmessungen über einen längeren Zeitraum berücksichtigt werden muss. Auch die Auflösung der vollen Wellenlänge bei größeren Bewegungen ist ein kritischer Faktor.

Bei einer Vielzahl von Aufgabenstellungen im Bereich der dynamischen und statischen Analyse von Bauwerken sowie beim Monitoring von Naturgefahren kann Mikrowelleninterferometrie die Messungen wesentlich verbessern und erleichtern. Trotz allem muss jede Messung vorher sorgfältig geplant werden. 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.

Die drei exemplarischen Beispiele mit ganz unterschiedlichen Zielgrößen zeigen das große Spektrum der Anwendungen und die dabei erreichbaren Auflösungen und Genauigkeiten.

Danksagung

Das IBIS Geräte wurde im Rahmen des Geotechnologienprojektes „Exupery“ vom Bundesministerium für Forschung und Technologie beschafft. Die Messungen in Steinlehen erfolgten im Rahmen des EU finanzierten KASIP-Projektes von Prof. A. Eichhorn, TU Darmstadt in Zusammenarbeit mit TU Wien und Alp-S.

Literaturverzeichnis

[1] *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, Proceedings of EVACES'07, 24-26 October 2007, Porto, Portugal.*

- [2] *Rödelsperger, S.; Läufer, G.; Gerstenecker, C. and Becker, M. (2010): Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L. Journal of Applied Geodesy, 4, pp. 41–54.*
- [3] *Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. and others (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, pp. 8–20.*
- [4] *Kampes, B. (2006): Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Remote Sensing and Digital Image Processing Series, Springer.*
- [5] *Rödelsperger, S. (2011): Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements. Dissertation, Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, ISBN 978-3-935631-22-8. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>*

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker, Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie, TU Darmstadt, Petersenstraße 13, D-64287 Darmstadt.
E-mail: becker@ipg.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Sabine Rödelsperger, Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie, TU Darmstadt, Petersenstraße 13, D-64287 Darmstadt.
E-mail: roedelsperger@ipg.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Gwendolyn Läufer, Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie, TU Darmstadt, Petersenstraße 13, D-64287 Darmstadt.
E-mail: laeuer@ipg.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider, Institut für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen, TU Darmstadt, Petersenstraße 12, 64287 Darmstadt.
E-mail: schneider@iwmb.tu-darmstadt.de

Vortragender

Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker

geb. 1955 Hanau

1979 Geodäsie an der TU Darmstadt

1984 Doktorat - Promotion zur Gravimetrie

2000–2004 Professor für Allgemeine Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München

seit 2004 Professor für Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie am Institut für Geodäsie, TU Darmstadt

Forschungsschwerpunkte:

GNSS, Referenzsysteme und Geodynamik, GNSS und INS Integration, Altimetrie, Gravimetrie und zeitvariable Schwereänderungen, Deformationsanalyse