

Untersuchungen zum räumlichen Auflösungsvermögen bei terrestrischer Mikrowelleninterferometrie¹

Studies on Spatial Resolution of Terrestrial Microwave Interferometry

Martin Lehmann, Björn Riedel

Terrestrische Mikrowelleninterferometrie hat als kontinuierliches und flächenhaft arbeitendes Beobachtungsverfahren im Bereich des Geo-Monitoring in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Für die Beurteilung der Ergebnisse ergibt sich eine Reihe von Fragestellungen, die mit dem räumlichen Auflösungsvermögen direkt zusammenhängen. Der vorliegende Beitrag behandelt erste Untersuchungen zur Georeferenzierung der Auflösungszellen, zur Entfernungsauflösung, zum Einfluss der Atmosphäre auf die Messungen und die frequenztechnische Untersuchung des Mikrowellensignals.

Schlüsselwörter: Terrestrische Mikrowelleninterferometrie, GBSAR, Auflösungsvermögen, atmosphärische Korrektur, Frequenzuntersuchung

Using Terrestrial Microwave Interferometry as a continuously and areal working geo-monitoring method has become more important in recent years. The assessment of the results causes numerous questions related to the spatial resolution. This article covers first investigations in the field of georeferencing of resolution cells, the range-resolution, the influence of the atmosphere due to the measurements, and frequency analysis of the microwave signal.

Keywords: Terrestrial microwave interferometry, GBSAR, spatial resolution, atmospheric correction, frequency investigation

1 EINLEITUNG

Für die Erfassung von großflächigen geometrischen Veränderungen von Teilen der Erdoberfläche, die bedingt sein können sowohl durch tektonische Aktivitäten als auch durch ausgedehnte Baumaßnahmen, hat sich im Bereich der satellitengestützten Fernerkundung die Methode des Interferometric Synthetic-Aperture-Radar (InSAR) etabliert. Aus dem vom Satelliten ausgesandten und dem empfangenen, von der Erdoberfläche reflektierten Signal werden Amplitude und Phasenlage abgeleitet (Abb. 1). Durch die wiederholte Aufnahme desselben Gebiets bei erneuten Überflügen des Satelliten ist – durch interferometrische Auswertungen – das Aufdecken von Verschiebungen möglich.

Die Sensitivität des Systems ist nur in Blickrichtung des Sensors (Line-of-Sight, LOS) gegeben und es ist dadurch nur in der Lage, Hebungen bzw. Senkungen des aufgenommenen Gebiets zu detektieren. Während die Auflösung in Range-Richtung auf Grund des Vergleichs der Phasenlagen als relativ gut betrachtet werden kann, ist jedoch die Auflösung in azimutaler 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.

¹ Überarbeitete Fassung des auf dem „10. Jenaer GeoMessdiskurs 2013“ am 02.07.2013 in Jena gehaltenen Vortrags.

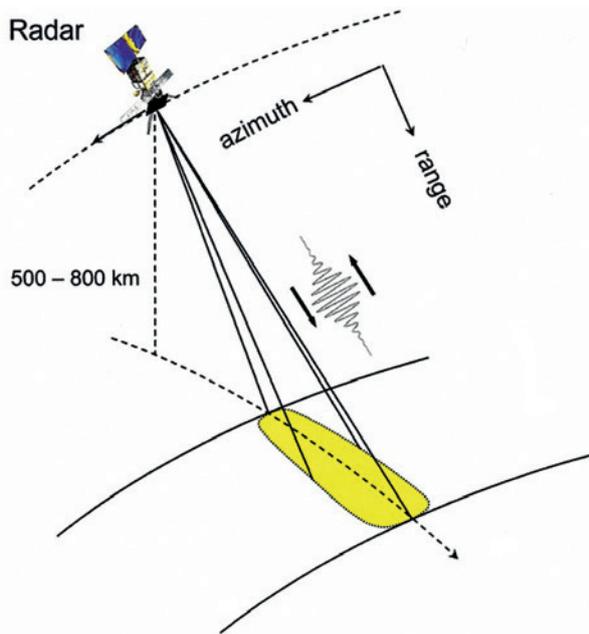


Abb. 1 | Abbildungsgeometrie eines SAR-Systems /Bamler et al. 2008/

Die InSAR-Technologie ist schon weit verbreitet im Einsatz und kann auch für den Nachweis von Veränderungen in der Vergangenheit, d. h. bei günstigster Datenlage bis ca. 20 Jahre zurück, erfolgreich eingesetzt werden. Ein eingehenderer Überblick über das InSAR-Verfahren findet sich in /Bamler et al. 2008/.

Beim Einsatz der satellitengestützten Radarinterferometrie für Aufgaben im Bereich des Hang- bzw. Böschungsmonitoring ergibt sich das grundlegende Problem, dass die Richtung der zu erwartenden Bewegungen ungünstig zur LOS des Satelliten liegt. Dies ist in *Abb. 2* dargestellt. Naheliegender, aber doch erst seit kurzem technisch realisiert, ist der Ansatz, das Messprinzip des InSAR auch für terrestrische Anwendungen nutzbar zu machen und somit die Beobachtungsrichtung entsprechend der erwarteten Bewegungsrichtung anzupassen.

2 TERRESTRISCHE MIKROWELLENINTERFEROMETRIE

Nach einem weitgehend identischen Messkonzept wie vom Welt- raum aus können bei der terrestrischen Mikrowelleninterferometrie, die international auch als „Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar (GBSAR)“ bezeichnet wird, geometrische Veränderungen für Objekte direkt von der Erde aus (ground-based) großflächig, hochpräzise und in kurzer Zeitfolge bestimmt werden. Das hier beschriebene GBSAR-System geht auf das Linear-SAR (LISA), eine Entwicklung des European Microwave Signature Laboratory des Joint Research Centre in Ispra, Italien, zurück /Nesti et al. 1996/, /Rudolf et al. 1999/. Erste praktische Erprobungen mit dem LISA-System an einer Staumauer finden sich in /Tarchi et al. 1999/.

Seit 2006 gibt es ein portables Radarsystem IBIS-L² der Firma Ingegneria dei Sistemi (IDS) aus Pisa (Italien),

das für den ingenieurgeodätischen Einsatz nutzbar ist /Rödelsberger et al. 2010/. Das IBIS-L ist ein kontinuierlich messendes System, das im Ku-Band bei 17,1 GHz bis 17,3 GHz (Wellenlänge = 1,8 cm) arbeitet. Die Auflösung in Blickrichtung des Sensors (range) beträgt 0,75 m und die Querauflösung (azimuth) ist 4,4 mrad. Die maximale Reichweite liegt bei 4000 m.

Abb. 3 stellt die beobachtete Fläche in Abhängigkeit von der Entfernung und dem Antennenöffnungswinkel dar. Somit ermöglicht das IBIS-L, eine flächenhafte Erfassung des Verformungsverhaltens von natürlichen und künstlichen Objekten, z. B. Hängen, Felsgraten oder Staudämmen, mit einem Genauigkeitsniveau im Bereich von 0,1 mm bis 1 mm ohne Installationen am Untersuchungsobjekt durchzuführen.

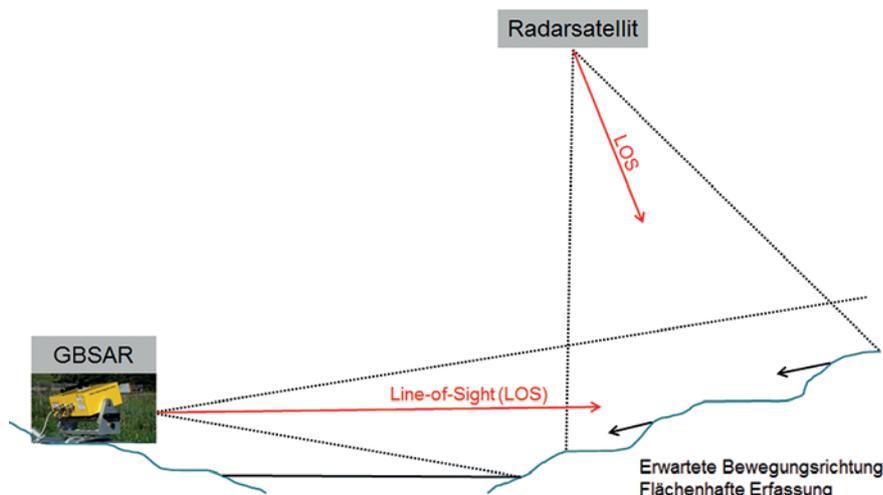


Abb. 2 | Darstellung der Sensitivität bei bodengebundener bzw. satellitengestützter Radarinterferometrie mit Bezug zur erwarteten Bewegungsrichtung

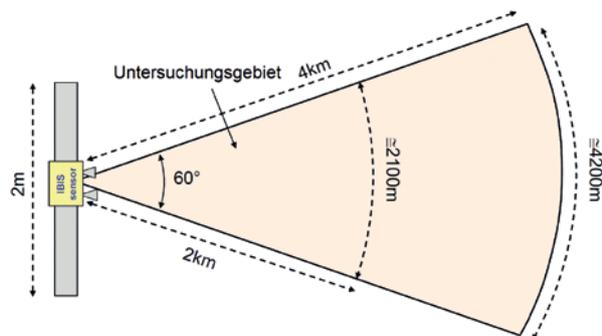


Abb. 3 | Darstellung der überdeckten Beobachtungsfläche des Untersuchungsgebietes (nach /IDS 2011/)

² IBIS - Image By Interferometric Survey



Abb. 4 | Standort des IBIS-L für die Messungen zum Testfeld Franzshes Feld (gelbe Markierung) in 2000 m Entfernung

In Abb. 4 ist ein IBIS-L-System während der im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Messungen zu sehen. Durch die horizontale Ausrichtung des Radarkopfs wird erreicht, dass die „Line-of-Sight“ des Sensors mit der kritischen Bewegungsrichtung des Untersuchungsobjekts weitgehend übereinstimmt.

Der wichtigste Faktor für die Auflösung in Blickrichtung ist bei einem gepulsten Radarsignal die reale, physikalische Pulslänge des jeweiligen Mikrowellensignals. Zur Steigerung dieser Auflösung (range-direction) wird beim IBIS-L-System das in der Elektrotechnik etablierte Prinzip des Stepped-Frequency Continuous-Wave (SF-CW) angewandt /Gentile 2010/. Der Sensor emittiert ein frequenzmoduliertes Signal konstanter Amplitude. Die Frequenz wird im Bereich von 17,1 GHz bis 17,3 GHz konstant in diskreten Frequenzstufen erhöht. Der Frequenzschritt ist abhängig von der maximal aufzulösenden Entfernung. Das am Objekt rückgestreute und aufgezeichnete Signal wird mithilfe einer Inversen Diskreten Fourier-Transformation (IDFT) vom Frequenzraum in den Objektraum transformiert. Hierbei wird der gesamte Objektraum in Auflösungszellen (range-bins) eingeteilt.

Von einem Gerätestandpunkt aus ist allerdings vom Grundprinzip her keine Unterscheidung zwischen Objekten möglich, die einen seitlichen Abstand voneinander haben, jedoch im selben range-bin liegen. Stark reflektierende Objekte, die im gleichen Entfernungsbereich liegen, sind im rückgestreuten Signal nicht mehr voneinander zu unterscheiden. Für die flächenhafte Abbildung des Objekts wird der Sensorkopf parallel zum Objekt bzw. senkrecht zur Blickrichtung verschoben. Diese durch einen Schrittmotor gesteuerte Verschiebung entlang einer stabilen Schiene dient der synthetischen Vergrößerung der Antenne (synthetic aperture) und der damit verbundenen räumlichen Querauflösung. Somit ergibt sich eine Zerlegung des Messbereichs in eine Pixelstruktur. Die Größe eines Pixels resultiert aus der Länge des range-bins (ΔR) und der Querauflösung (ΔCR) (Abb. 5).

Bei der Auflösungszelle handelt es sich um ein Volumenelement, das aufgrund der Aufnahmegeometrie aufgespannt wird (Abb. 6). Im Rahmen der Auswertung wird diese Volumenzelle als Flächenelement (Pixel) verebnet dargestellt.

Spatial resolution

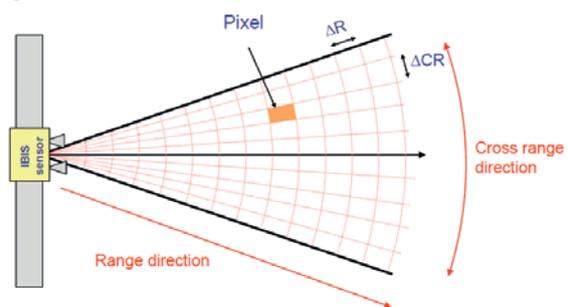


Abb. 5 | Darstellung der zu erreichenden Abdeckungen und Auflösungen. ΔR bezeichnet hierbei die Auflösung in Range und ΔCR die Querauflösung /IDS 2011/

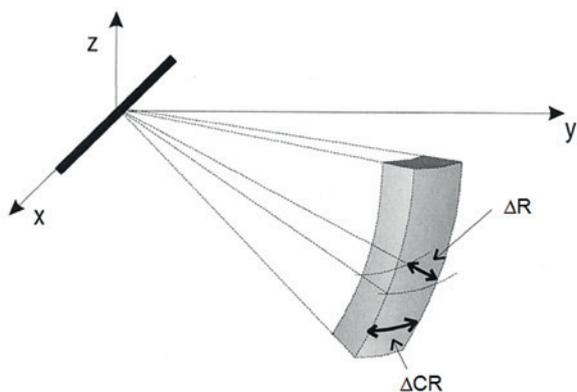


Abb. 6 | Darstellung der räumlichen Auflösung (nach /Pieraccini et al. 2001/)

Innerhalb einer jeden Auflösungszelle wird die integrale Phasenlage des zurückgestrahlten Signals für die Bestimmung von Verschiebungen verwendet. Bewegt oder deformiert sich die Objektoberfläche, so ergibt sich bei wiederholter Erfassung mit einem GBSAR-System eine abweichende Phasenlage. Vergleichbar zum satellitengestützten InSAR ergibt sich diese interferometrische Phasenänderung für die Objektverschiebung zu /Rödelsperger et al. 2010/:

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} - 2\pi n.$$

Durch die kontinuierliche Messung mit dem GBSAR von einem festen Gerätestandpunkt aus kann diese Formel vereinfacht werden zu:

$$\varphi = \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} - 2\pi n,$$

wobei das gesuchte Deformationssignal φ_{disp} ist.

Der Atmosphärenanteil (φ_{atm}) ist wie das Systemrauschen φ_{noise} dem beobachteten Signal φ überlagert. Das n steht für die vollen Wellenzyklen des beobachteten Verschiebungsvektors.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurde die herstellereigene IBISDV-Software verwendet. Mit dieser Software ist es möglich, die Radarrohdaten zu fokussieren, zu prozessieren und anschließend die Ergebnisse darzustellen. Dies kann in Form von 2D-Grafiken oder auch Zeitreihen einzelner Punkte erfolgen. Durch die Auswahl von Ground-Control-Points (GCP) ist auch eine Korrektur atmosphärischer Einflüsse in einem gewissen Maß möglich (vgl. Abschnitt 6).

Für die Beurteilung der Ergebnisse beim Einsatz des GBSAR im Bereich des Monitorings sind die folgenden Fragestellungen von Bedeutung:

- Georeferenzierung der Auflösungszelle:
Zuordnung von 2D-Radarergebnissen zu 3D-Objektbewegungen;
- Überprüfung der Entfernungsauflösung:
Auflösung der interferometrischen Phasenverschiebung entlang einer vollen Wellenlänge;

- Untersuchung des Atmosphäreinflusses:
Nutzung von meteorologischen Daten zur Interpretation der Ergebnisse des Deformationssignals;
- Frequenztechnische Untersuchung des Mikrowellensignals:
für die Grundfrequenz, die Bandbreite und die Modulation.

3 UNTERSUCHUNGEN ZUM RÄUMLICHEN AUFLÖSUNGSVERMÖGEN

Die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellten Untersuchungen beruhen auf der Verwendung von Zielen mit bekannter Position, welche sich gleichmäßig im Beobachtungsbereich des GBSAR verteilen. Die Messungen zur Umsetzung dieses Konzepts wurden im Stadtgebiet Braunschweig durchgeführt. Hierfür wurde das IBIS-L auf dem Dach des Institutsgebäudes installiert (Abb. 4). Ein Vorteil bei der Durchführung der Messungen im urbanen Raum ist das Vorhandensein von „natürlichen“ Objekten, welche als mögliche Zielpunkte in Frage kommen, da sie zum einen gute Reflektoren sind und zum anderen die genaue Erfassung ihrer Position verhältnismäßig einfach ermöglichen. Die typische Stadtstruktur, rechtwinklige Anordnung von Straßenzügen und Häusern (Dächer) ist in Abb. 7 im linken Teil des Amplitudenbilds klar ersichtlich. Im rechten Teil des Amplitudenbilds finden sich nur vereinzelte Rückstreuer, wie das Objekt „Bunker“ und der künstliche Rückstreuer Corner-Reflektor (CR, vgl. Abschnitte 4 und 5). Der Grund hierfür liegt in der Lage beider Objekte in den Grünflächen eines städtischen Parks. Dadurch

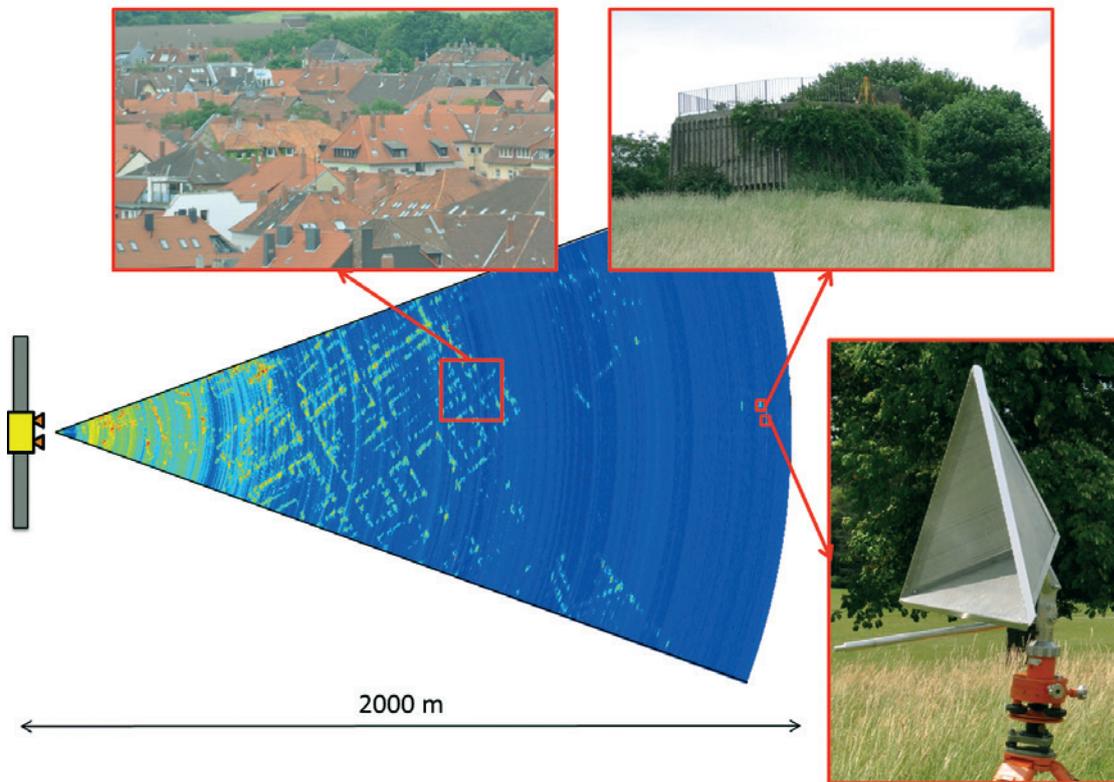


Abb. 7 | Darstellung ausgewählter Rückstreuer im Amplitudenbild. Im linken Teil ist die typische Stadtstruktur, rechtwinklige Anordnung von Straßenzügen und Häusern (Dächer), ersichtlich. Im rechten Teil finden sich nur vereinzelte Rückstreuer, wie das Objekt „Bunker“ und der künstliche Rückstreuer Corner-Reflektor im Untersuchungsgebiet Franzisches Feld

ist die Identifikation der einzelnen markanten Rückstreuer deutlich vereinfacht, da deren rückgestreutes Signal sich deutlich vom umgebenden Rauschen abhebt.

Die Bestimmung der Referenzpositionen der einzelnen Ziele erfolgt bei dem hier vorgestellten Verfahren mittels differenzieller GNSS-Methoden und Tachymetrie. Die dabei erzielbare Genauigkeit der 3D-Positionsbestimmung lag bei ca. 0,02 m und wird für die Bestimmung der Auflösungszellen als ausreichend angesehen, da die Auflösungszellen in ihrer geringsten Ausdehnung (in range) 0,75 m messen und in 2000 m Entfernung eine Querauflösung (azimuth) von 8,8 m haben.

4 GEOREFERENZIERUNG DER AUFLÖSUNGZELLE

Für die Georeferenzierung der Auflösungszellen wurden neben dem bereits erwähnten Ziel „Bunker“ (1900 m Entfernung) zusätzlich Corner-Reflektoren im Bereich des Bunkers und eine in 3400 m Entfernung gelegene Kirche als Ziele genutzt. In *Abb. 8* sind die Ziele (Bunker (links) und Kirche (rechts)) durch Markierungen verdeutlicht.



Abb. 8 | Überblick über das Messgebiet Franzisches Feld vom Gerätestandpunkt aus aufgenommen (siehe Abb. 4). Hervorgehoben sind die Ziele „Bunker“ (links) und „Kirche“ (rechts)

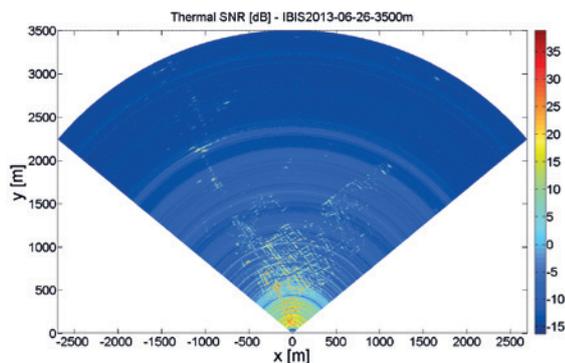


Abb. 9 | Beispiel für die Darstellung des Amplitudenbilds im IBISDV. Hervorgehoben sind die Ziele „Bunker“ (Mitte) und „Kirche“ (oben)

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zunächst die in der Auswertesoftware angegebenen Positionen verschiedener Ziele mit deren Positionen in der Realität verglichen. Eine Besonderheit bei der Nutzung des IBISDV ist, dass die Darstellung in Form eines ebenen, kartesischen Koordinatensystems mit Ursprung in der Mitte des IBIS-L-Systems erfolgt. Ein Beispiel für diese Darstellung findet sich in *Abb. 9*.

Für den Vergleich der in dieser Darstellung bestimmten Position mit der im Feld bestimmten 3D-Position ist eine Transformation notwendig. Hierfür werden mehrere Positionen des Radarkopfs auf der Schiene bestimmt, sodass zum einen die mittlere Position in dem vom GNSS verwendeten Koordinatensystem vorliegt. Zum anderen lässt sich aus den übrigen Positionen des Radarkopfs das Azimut (die Blickrichtung) des IBIS-L ableiten. Für eine genaue Bestimmung der Position der bekannten Objekte werden vergrößerte Ausschnitte der Darstellung verwendet (*Abb. 10*) und die „Bild“-Koordinaten abgegriffen.

In der nachfolgenden *Tab. 1* sind beispielhaft für die Ziele „Bunker“ und „Kirche“ Koordinaten im Koordinatensystem des IBISDV dargestellt.

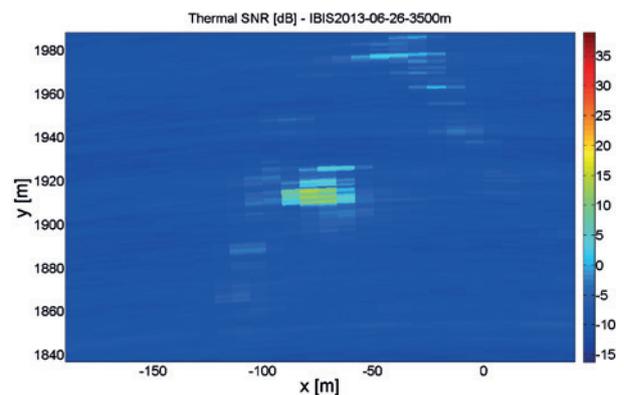


Abb. 10 | Vergrößerte Darstellung des Ziels „Bunker“ im IBISDV

	Aus Transformation		Gemessen im IBISDV		Differenzen	
	X in m	Y in m	X in m	Y in m	ΔX in m	ΔY in m
Bunker	-73,06	1 909,98	-75,35	1 909,00	2,29	0,98
Kirche	52,44	3 420,25	59,97	3 420,00	7,53	0,25

Tab. 1 | Vergleich der Koordinaten der Punkte „Bunker“ und „Kirche“ im IBISDV-Koordinatensystem

Der Grund für die in der Tab. 1 deutlich zu erkennenden Abweichungen zwischen den Positionen liegt zum einen in der Aufnahmegeometrie (Abb. 6) und zum anderen in der Abbildung der Daten in das 2D-Koordinatensystem. Daher deckt eine Auflösungszelle (hier als Pixel dargestellt) je nach Entfernung eine sehr große Fläche des überwachten Objekts ab. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 11 dargestellt. Das hier dargestellte Pixel hat eine Ausdehnung von ca. 15 m in der Breite (entsprechend der Querauflösung von 4,4 mrad auf 3 400 m) und 0,75 m in der Höhe (entspricht der range-Auflösung, Abb. 11). Erschwerend kommt hinzu, dass bei guten Rückstreuern (hier die Kirche) ein sehr hoher Signalanteil zurückgestreut wird. Dies führt im Verarbeitungsschritt der Fokussierung dazu, dass bei der IDFT Artefakte auftreten und das Signal in der Darstellung „verschmiert“ wird.

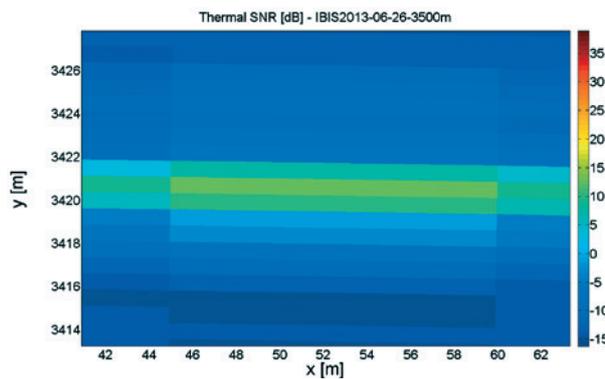


Abb. 11 | Vergrößerte Darstellung des rückgestreuten Signals „Kirche“

5 ÜBERPRÜFUNG DER ENTFERNUNGS-AUFLÖSUNG

Wie bereits in Abschnitt 4 erwähnt, werden für einige Ziele sogenannte Corner-Reflektoren eingesetzt, da sich das in einer Auflösungszelle registrierte zurückgestreute Signal stets aus der Summe der Signale aller Rückstreuer in dieser Zelle zusammensetzt. Zusätzlich muss das zurückgestreute Signal auch noch größer sein als das die Auflösungszelle umgebende Rauschen. Ein CR hat bei entsprechender Ausrichtung zum GBSAR nun den Vorteil sowohl ausreichend Signal zurückzustreuen und außerdem noch der dominanteste Streuer in der Auflösungszelle zu sein.

Die Untersuchung der Entfernungsauflösung wurde unter Zuhilfenahme eines Kreuzschlittens vorgenommen. Mit diesem ist es möglich, den CR um definierte Abstände in der Beobachtungsrichtung (LOS) zu verschieben. In Abb. 7 (rechts unten) ist diese Konstruktion dargestellt.

Die Verschiebung des Kreuzschlittens fand jeweils zwischen den einzelnen Aufnahmen des IBIS-L statt. Hierbei wurden Versuche mit verschiedenen Schrittweiten (2 mm, 3 mm und 4 mm) durchgeführt. In Abb. 12 ist das Ergebnis eines dieser Kreuzschlittenexperimente dargestellt. Hierbei wurde mit dem Kreuzschlitten ein voller Durchgang (30 mm) zum IBIS-L hin mit Schritten von 2 mm durchgeführt. Neben der Zeitreihe des Kreuzschlittens (blaue Linie) ist als Referenz für ein unbewegtes Objekt in direkter Nähe zum Kreuzschlitten das zeitliche Verhalten des Bunkers dargestellt (rote Linie).

Die erkennbare „Pseudo“-Bewegung des Bunkers ist auf atmosphärische Einflüsse zurückzuführen. Aufgrund der räumlichen Nähe ist davon auszugehen, dass diese Einflüsse auch in der Zeitreihe des Kreuzschlittens zu finden sind und das Ergebnis beeinflussen. Für die Reduktion der atmosphärischen Einflüsse wird der Bunker als sogenannter Ground-Control-Point in der Auswertung verwendet. Das atmosphärisch korrigierte Ergebnis findet sich in Abb. 13. Eine eingehendere Untersuchung zu dem durch die Atmosphäre verursachten Einfluss findet sich in Abschnitt 6.

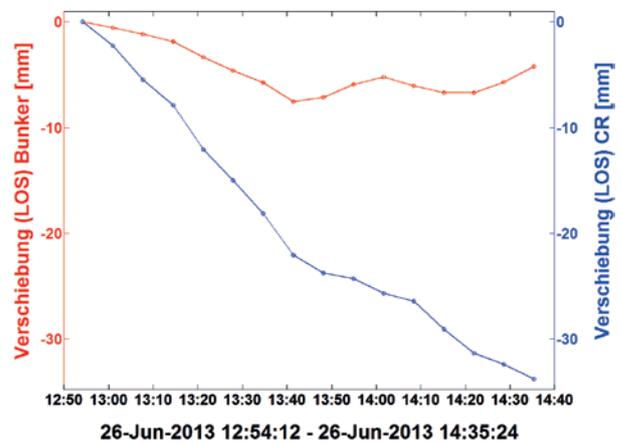


Abb. 12 | Zeitreihen des Kreuzschlittenexperimentes. Die rote Linie zeigt den Verlauf der „Pseudo“-Bewegung des Bunkers, die blaue Linie den Verlauf der Bewegung des Corner-Reflektors. Es wurde keinerlei Korrektur der atmosphärischen Einflüsse vorgenommen

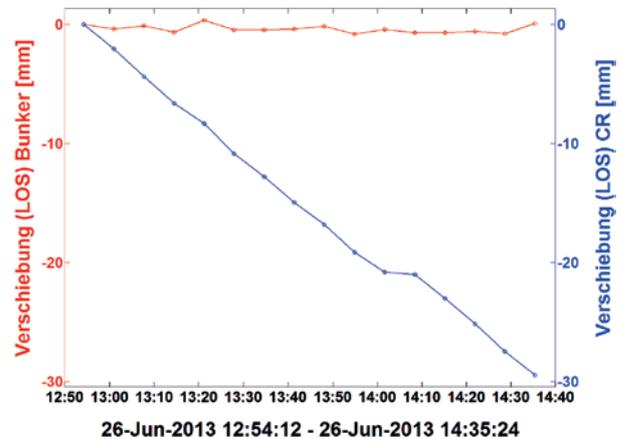


Abb. 13 | Zeitreihen des Kreuzschlittenexperimentes. Die rote Linie zeigt den Verlauf der Bewegung des Bunkers, die blaue Linie den Verlauf der Bewegung des Corner-Reflektors. Es wurde eine atmosphärische Korrektur mittels eines GCP am Bunker vorgenommen

Zeitpunkt	12:54	13:00	13:07	13:21	13:27	13:34	13:41	13:48	13:54	14:01	14:08	14:15	14:21	14:28	14:35	13:07
Residuum in mm	0,0	0,1	0,3	0,1	0,4	-0,1	-0,1	0,3	-0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,2

Tab. 2 | Residuen von eingestellten und gemessenen Veränderungen des Kreuzschlittens in LOS

Es zeigt sich, dass die vom atmosphärischen Einfluss bereinigte Zeitreihe sehr gut die einzelnen Schritte der Kreuzschlittenverschiebungen abbildet. Für eine genauere Betrachtung wurde für jede Position des Kreuzschlittens das Residuum zur Sollverschiebung berechnet. Das Ergebnis ist in *Tab. 2* dargestellt.

6 UNTERSUCHUNG DES ATMOSPHÄRENEINFLUSSES

Die GBSAR-Messungen mit dem IBIS-L-System werden im Mikrowellenbereich von 1,8 cm bzw. bei 17,1 GHz durchgeführt. In diesem Frequenzbereich arbeiteten auch die Mikrowellendistanzmesser der 1970er- und 1980er-Jahre, wie z. B. das SIAL MD 60 oder das Tellurometer MRA 6, die bei einer Frequenz von 10,3 GHz bzw. 16,8 GHz arbeiteten.

Die einschlägige geodätische Literatur beschreibt die starke Abhängigkeit dieses Frequenzbereichs vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre /Kahmen 1977/, /Brunner 1984/, /Joeckel & Stober 1989/. Der Einfluss von Temperatur und Druck auf die Streckenänderungen im Mikrowellenbereich ist nahezu identisch zum Einfluss dieser Parameter auf die elektrooptische Distanzmessung. Allerdings ist der Einfluss des Dampfdrucks e (rel. Feuchte) in der Größenordnung von 4 ppm für eine Dampfdruckänderung von 1 hPa deutlich der größte Korrekturterm.

Das vom IBIS-L auf Basis der SF-CW-Technik ausgesandte Radarsignal unterliegt genauso wie die klassischen Mikrowellendistanzmesser dem Einfluss der Atmosphäre. Auch hierbei muss man den Einfluss der Atmosphäre auf die Auflösungszelle und die damit verbundene Phasenlage berücksichtigen. Betrachtet man eine typische Streckenlänge von 2000 m und berücksichtigt die zur Zeit aktuellste Bestimmungsformel für den Atmosphäreneinfluss nach /Rüeger 2002/ bzw. /Joeckel et al. 2008/, so erhält man bei folgenden äußeren Ausgangsbedingungen von $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$ und einer relativen Feuchte von 60 % bzw. $e = 14 \text{ hPa}$ die folgenden Streckenkorrekturen: Eine Änderung der Temperatur von 1 K führt zu einer Änderung des Streckenmessergebnisses von 5 mm, 1 hPa im Druck hat einen Einfluss von 0,5 mm und 1 hPa Druckänderung im Dampfdruck bzw. 5 % in der relativen Feuchte führt zu einer Änderung von 9 mm.

Betrachtet man hierzu auch noch die Wellenlänge von 18 mm, so zeigt sich, dass der Berücksichtigung der Temperatur und des Dampfdrucks ein große Bedeutung zukommt, da laut Hersteller die Bewegungsraten zwischen zwei Radaraufnahmen $\lambda/4$ ($= 4,5 \text{ mm}$) nicht übersteigen sollen. Diesem geodätischen Korrekturansatz liegt die Annahme einer homogenen Atmosphäre entlang der Wellenausbreitung zugrunde. Diese könnte man näherungsweise durch Erfassung von meteorologischen Daten am Gerätestandpunkt und zeitgleich am Untersuchungsobjekt realisieren und die Korrektur für jede Auflösungszelle in der Radardatenauswertung berücksichtigen.

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, nutzt die vom Hersteller bereitgestellte Software IBISDV zur atmosphärischen Korrektur GCP. Die Korrektur mittels GCP beruht auf der Auswahl von einen oder mehreren Punkten, die stabil über den Messzeitraum sind. Hierbei werden „Pseudo“-Bewegungen in Korrekturwerte umgerechnet und diese Werte dann an den benachbarten Pixeln angebracht. Dies funktioniert nur im direkten Bereich der GCP, da die Atmosphäre zu inhomogen ist. Bei den empirischen Untersuchungen zeigte sich, dass der Einflussbereich der GCP auf die Nachbarschaft bei 200 m endet.

Im Rahmen der Untersuchungen des Atmosphäreneinflusses wurde der IBIS-L-Datensatz im Zeitraum vom 26. Juni 16.30 Uhr bis 28. Juni 2013 10:40 Uhr genutzt. Die Wetterdaten wurden am Gerätestandpunkt auf dem Hochhaus mit einer Mevis-Wetterstation erfasst. In *Abb. 14* ist die relative Veränderung von Temperatur, Druck und Feuchte in Prozent für diesen Zeitraum dargestellt.

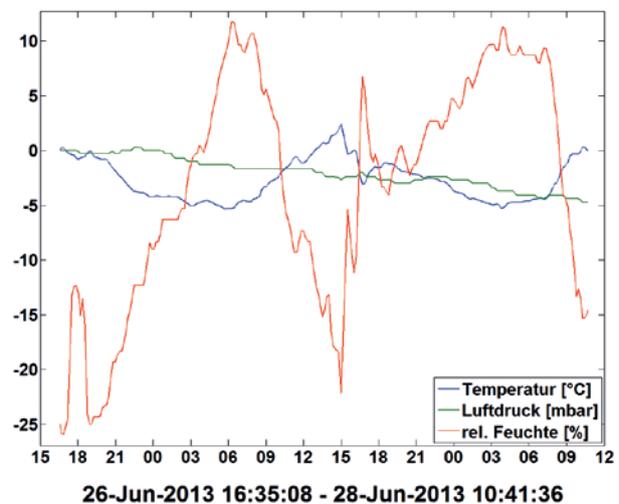


Abb. 14 | Relative Änderung in Prozent von Druck, Temperatur und relative Feuchte über einen Zeitraum von 42 Stunden

Die Luftdrucktendenz war von 1023 hPa auf 1018 hPa fallend, die Temperatur erreichte ein Maximum von 18 °C und hatte ein Minimum von 11 °C. Die Schwankungen der relativen Feuchte in diesem Zeitraum lagen zwischen 48 % und 86 %. In *Abb. 15* ist der Verlauf der Änderung der 1911 m langen Raumstrecke vom IBIS-L zu einem ausgewählten Referenzpixel am Bunker(-punkt) für den gesamten Zeitraum dargestellt. Dieser Referenzpunkt wurde anhand der Rückstreuungseigenschaften der in *Abb. 10* dargestellten Bunkerpixel ausgewählt.

Man erkennt deutlich einen Tagesgang in der Pseudobewegung für das ausgewählte Pixel am stabilen Objekt. Das Verschiebungsmaximum um 09.00 Uhr ist hoch korreliert mit dem Feuchtemaximum bzw. Temperaturminimum zur selben Uhrzeit. Führt man einen stabilen Kontrollpunkt am Objekt Bunker in die Auswertung ein, so

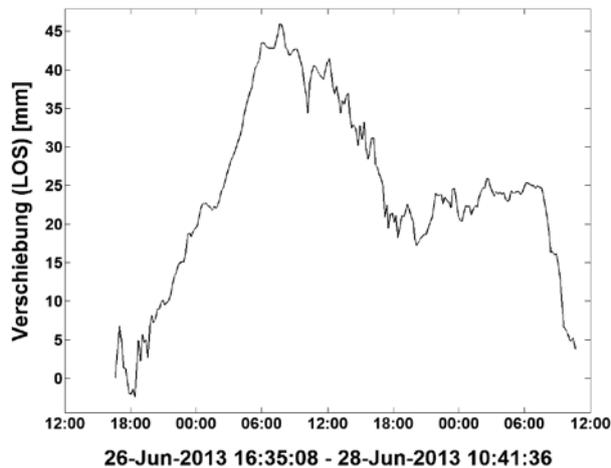


Abb. 15 | Atmosphärisch bedingte Pseudobewegung eines ausgewählten Pixels (Referenzpunkts) am Bunker ohne jegliche Korrektur mittels atmosphärischer Daten, GCP oder eines Persistent-Scatterer-Ansatzes

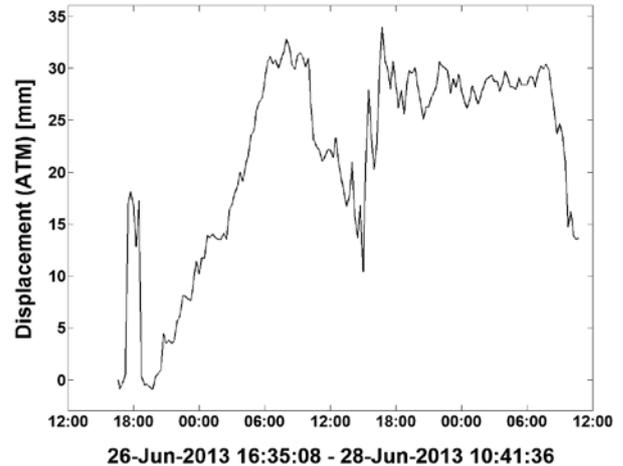


Abb. 17 | Atmosphärische Korrektur in mm für die 1 911 m lange Raumstrecke vom IBIS-L zum Bunkerpunkt

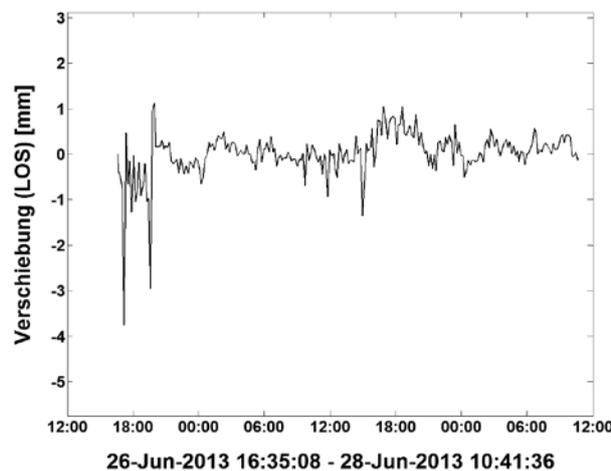


Abb. 16 | Restbewegung des ausgewählten Referenzpixels am Bunker nach Korrektur mit benachbarten GCP am Bunker

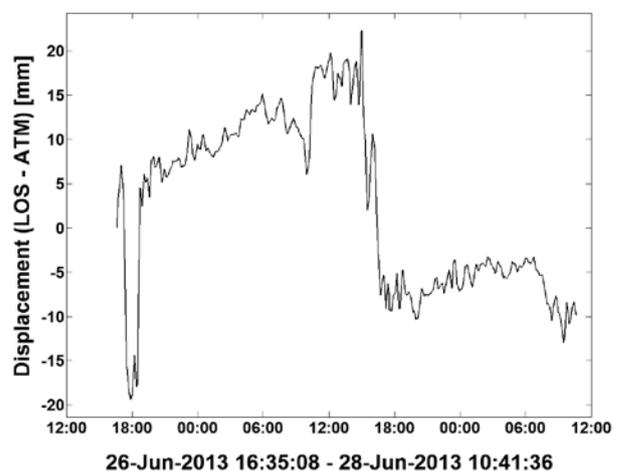


Abb. 18 | Atmosphärisch korrigierte Bewegung des Referenzpixels am Bunker

erhält man als Ergebnis eine Grafik, wie sie in *Abb. 16* dargestellt ist. Lediglich der kurzzeitige Wechsel in der relativen Feuchtigkeit um 18.00 Uhr führt noch zu Pseudobewegungen im Millimeterbereich für den Bunkerpunkt. Das verbleibende Rauschen von ± 1 mm kann man als Systemrauschen für die knapp 2 000 m lange Beobachtungstrecke betrachten bzw. als resultierende Messgenauigkeit für diese Entfernung nach optimaler Atmosphärenkorrektur, da das Referenzpixel und der ausgewählte GCP nur 1 Pixel auseinander liegen.

Versucht man den Einfluss der Atmosphäre für diesen Zeitraum mithilfe der erfassten Wetterdaten nach /Joeckel et al. 2008/ zu modellieren, so erhält man für die 1 911 m lange Raumstrecke eine Zeitreihe von Korrekturwerten, wie sie in *Abb. 17* dargestellt sind.

Korrigiert man mithilfe dieser Zeitreihe die unkorrigierten Beobachtungen in LOS aus *Abb. 15*, so erhält man die Zeitreihe der Referenzpixelbewegung des Bunkerpunkts. Betrachtet man das Ergebnis dieses Ansatzes in *Abb. 18*, so zeigt sich, dass dieser Ansatz hervorragend für die Zeiten einer stabil geschichteten bzw. ruhigen Atmosphäre geeignet ist, dies umfasst primär den Nachtzeitraum.

Die tagsüber auftretenden Schwankungen bzw. starken Gradienten der relativen Feuchte bzw. des Dampfdrucks kann dieser Ansatz nicht ausreichend kompensieren. Diese Gradienten sind auch in der Lösung mittels GCP in IBISDV nicht vollständig eliminiert.

7 FREQUENZTECHNISCHE UNTERSUCHUNG DES MIKROWELLENSIGNALS

Von Seiten des Herstellers wird für das IBIS-L-System eine Grundfrequenz von 17,1 GHz mit einer Bandbreite von 200 MHz angegeben. Um die Grundfrequenz, die Bandbreite und die durch die SF-CW bedingte Frequenzerhöhung untersuchen zu können, wurden bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig verschiedene Frequenzmessungen durchgeführt. Der verwendete Signal-Analyzer zeichnet über ein zu wählendes Zeitfenster das Integral der empfangenen Energie im ausgewählten Frequenzbereich auf. Dessen eigene Grundfrequenz wurde über einen Abgleich am Zeitnormal der PTB validiert.

Hierbei ist zu beachten, dass der Analyzer und das IBIS-System nicht synchronisiert sind, d. h. der Radarkopf sendet bzw. moduliert die Frequenz und der Analyzer tastet sich durch das vorgegebene Frequenzfenster. Diese Abtastung bzw. Diskretisierung auf der Seite des Analyzers erfolgt stufenweise in 1-kHz-Schritten für eine vorgegebene sweep time.

Für die Frequenzmessung des IBIS-L-Radarkopfs wurde eine Hochfrequenzantenne mit einem Messbereich von 10 GHz bis 50 GHz genutzt. Mit dieser Antenne ist man in der Lage, Frequenzen außerhalb des IBIS-L-Frequenzbereichs zu bestimmen bzw. die Schärfe der Frequenzen zu kontrollieren. *Abb. 19* zeigt die gewählte Messanordnung. Die Hornantenne wurde so platziert, dass die ausgesandte elektromagnetische Welle direkt und von der Atmosphäre unbeeinflusst gemessen werden konnte; der Abstand zwischen dem Radarkopf und der Antenne lag bei allen Experimenten unter einem Meter.



Abb. 19 | Messanordnung zur Frequenzbestimmung des IBIS-L über die gesamte Frequenzbandbreite im Außenbereich der PTB. Links ist die Hochfrequenzantenne der PTB zusehen

Die Messungen mit dem Signal-Analyzer umfassten die Messung der Grundfrequenz bei 17,1 GHz, wie in *Abb. 20* dargestellt. Hierbei ist der symmetrische Peak bei 17,1 GHz klar ersichtlich. In dieser Abbildung erkennt man, dass die ausgesandte Energie bei der Startfrequenz von 17,1 GHz deutlich über dem Grundrauschen liegt und die Herstellerangaben für den Frequenzbereich eingehalten werden.

In *Abb. 21* ist die gesamte Bandbreite des Frequenzspektrums von 200 MHz des IBIS-L-Systems abgebildet. Klar ersichtlich sind hierbei der Beginn und das Ende des IBIS-L-Frequenzspektrums. Das Grundrauschen („noise“) liegt bei ca. -107 dB Signalstärke und die ausgesandte Energie über die Bandbreite ist durchgehend bei allen Peaks bei -75 dB.

Bedingt durch die graphische Auflösung von 691 darstellbaren Messpunkten kann nicht jeder einzelne Frequenzschritt aus der SF-CW-Modulation dargestellt werden. Die dargestellten Peaks repräsentieren jeden 20-ten Frequenzschritt der SF-CW-Modulation. Die unterschiedlichen Strichstärken in der graphischen Darstellung sind bedingt durch die hohe Abtastfrequenz von 1 kHz und die Integrationsdauer der Signale über die sweep time von 23 Sekunden.

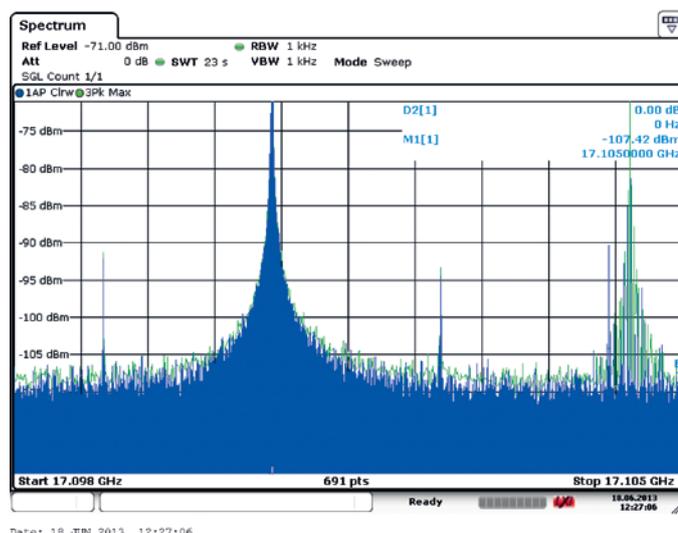
In *Abb. 22* wurde die Abtastfrequenz auf 20 kHz gesetzt mit einer sehr kurzen Aufzeichnungszeit von 3 ms, dies führt über den dargestellten Messbereich von 17,099 GHz bis 17,110 GHz zu 14 peaks. Auch hier repräsentiert jeder Peak den 20-ten Frequenzschritt der SF-CW-Modulation bei gleichbleibender ausgesandter bzw. empfangener Intensität. Durch die kurze Aufzeichnungsrate erhält man eine schärfere Darstellung der Frequenzschritte, da nur über die kurze Zeitspanne die Signale aufgezeichnet werden.

Letztendlich zeigen diese drei Abbildungen (*Abb. 20 bis 22*), dass das IBIS-L-System mit der SF-CW-Modulation bei einer Grundfrequenz von 17,1 GHz arbeitet, die vom Hersteller angegebene Bandbreite von 200 MHz eingehalten wird und dass die Frequenzschritte äquidistant durch das Frequenzspektrum laufen.

8 ZUSAMMENFASSUNG

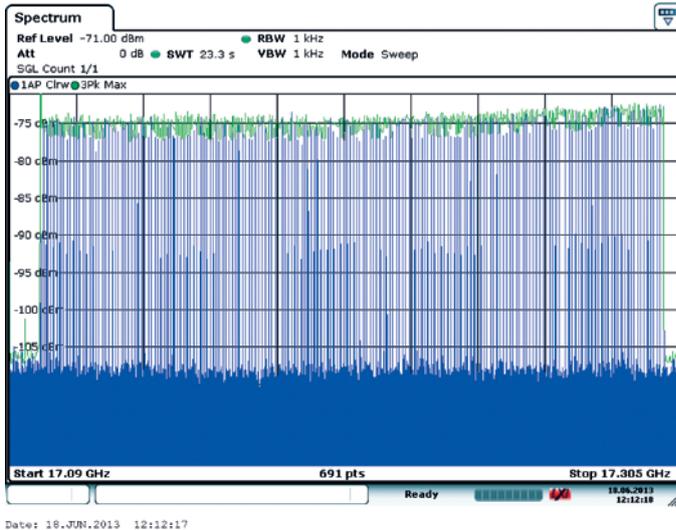
Im vorliegenden Beitrag wurden erste Untersuchungen zum räumlichen Auflösungsvermögen bei terrestrischer Mikrowelleninterferometrie vorgestellt. Für die Georeferenzierung der Auflösungszellen kann festgehalten werden, dass die Lokalisierung der einzelnen Pixel des Radarbilds zu den zugehörigen Geo-Objekten mit hinreichender Genauigkeit erfolgt. Für Objekte mit sehr guten, starken Rückstreuungseigenschaften kommt es zur Überstrahlung in benachbarte Pixel und damit einhergehend zu Informationsverlusten. Die Untersuchungen zur Entfernungsauflösung ergaben bei Berücksichtigung der atmosphärischen Einflüsse, dass Verschiebungen mit der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit auch über große Entfernungen nachweisbar sind.

Die aus der Mikrowellenentfernungsmessung bekannten atmosphärischen Einflüsse wirken auch bei der terrestrischen Mikrowelleninterferometrie und müssen entsprechend berücksichtigt werden. Auch die frequenztechnische Untersuchung des Mikrowellensignals zeigt, dass die Angaben des Herstellers eingehalten werden. Eine Aussage über die Langzeitstabilität der Grundfrequenz kann noch nicht getroffen werden.



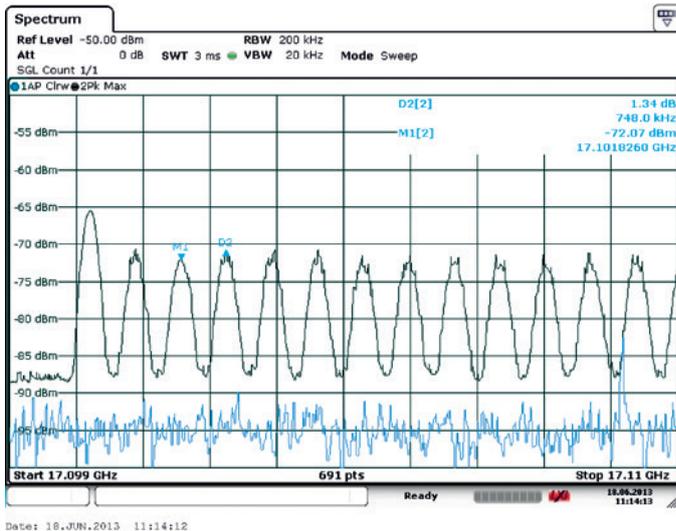
Date: 18.JUN.2013 12:27:06

Abb. 20 | Bestimmung der Grundfrequenz von 17,1 GHz



Date: 18. JUN. 2013 12:12:17

Abb. 21 | Gesamtes Frequenzspektrum mit konstanten Peaks bei der CW-SF bedingten Frequenzänderung



Date: 18. JUN. 2013 11:14:12

Abb. 22 | Messbereich von 17,099 bis 17,110 GHz bei stark verkürzter sweep time (Aufzeichnungsrate)

9 DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Arbeitsgruppe 2.21 – Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig für die Unterstützung bei der Durchführung der frequenztechnischen Untersuchung. Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts GMES-4Mining (www.gmes4mining.info) durchgeführt.

LITERATUR

- Bamler, R.; Adam, N.; Hinz, S.; Eineder, M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 115(2008)7, 243–252.
- Brunner, F. K. (1984): Geodetic Refraction. Springer, Berlin/Heidelberg/New York/Tokio.
- Gentile, C. (2010): Application of Radar Technology to Deflection Measurement and Dynamic Testing of Bridges. In: Kouemou, G. (Hrsg.): Radar Technology.
- IDS (2011): A synthetic aperture radar for slope movement monitoring in open-pit mines. Training Course, Pisa.
- Joekel, R.; Stober, M. (1989): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung. Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Joekel, R.; Stober, M.; Huepp, W. (2008): Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. Wichmann, 5. Auflage.
- Kahmen, H. (1977): Elektronische Messverfahren in der Geodäsie. Wichmann, Karlsruhe.
- Nesti, G.; Fortuny, J.; Sieber, A. J. (1996): Comparison of backscattered signal statistics as derived from indoor scatterometric and SAR experiments. In: IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1996.
- Pieraccini, M.; Luzi, G.; Atzeni, C. (2001): Terrain mapping by ground-based interferometric radar. In: IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001.
- Rödelsberger, S.; Läufer, G.; Gerstenecker, C.; Becker, M. (2010): Terrestrische Mikrowelleninterferometrie – Prinzip und Anwendungen. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 117(2010)10, 324–333.
- Rudolf, H.; Leva, D.; Tarchi, D.; Sieber, A. J. (1999): A mobile and versatile SAR system. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 99 Proceedings, IEEE 1999 International.
- Rüeger, J. M. (2002): Refractive Index Formulae for Radio Waves. In: JS28, FIG, XXII International Congress, Washington/USA, April 19–26, 2002.
- Tarchi, D.; Rudolf, H.; Luzi, G.; Chiarantini, L.; Coppo, P.; Sieber, A. J. (1999): SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 99 Proceedings, IEEE 1999 International.

Dipl.-Ing. Martin Lehmann

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
PHOTOGRAMMETRIE

Pockelsstraße 3 | 38106 Braunschweig
martin.lehmann@tu-bs.de



Dr.-Ing. Björn Riedel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND
PHOTOGRAMMETRIE

Pockelsstraße 3 | 38106 Braunschweig
b.riedel@tu-bs.de

