



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 40



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

8. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**8. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 40

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W. Zastrau

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 42 77
Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer
Korrekturen: Angela Heller
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan
Titelfoto: Kathrin Dietz
Probelastung an Fahnenstangen am Goldenen Reiter in Dresden

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf www.qucosa.de

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, September 2015

ISSN 1613-6934

Inhalt

DAfStb-Sachstandbericht <i>Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung bestehender Bauwerke</i> <i>Jürgen Schnell, Michael Weber</i>	5
Dynamik von Stahlbetonbrücken – Messprojekte aus dem Eisenbahn- und Straßenverkehr <i>Lutz Auersch, Samir Said</i>	17
Messtechnische Überlegungen bei Fallversuchen <i>Tino Kühn</i>	31
Identifikation dynamischer Strukturparameter von Eisenbahnbrücken mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie <i>Jens Schneider, Matthias Becker, Andrei Firus, Jiny Pullamthara, Michael Drass</i>	47
Einsatzmöglichkeiten der Schallemissionsanalyse im Bauwesen <i>Stephan Pirskawetz, Julia Wolf, Wolfram Schmidt, Andreas Rogge</i>	61
Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens-André Paffenholz, Ulrich Stenz, Ingo Neumann</i>	73
Experimentelle Untersuchung zum Systemtragverhalten neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens Piehler, Michael Hansen, Gerd Kapphahn</i>	81
Tragfähigkeitsuntersuchungen an historischen Fahnenmasten <i>Silke Scheerer, Sabine Wellner, Torsten Hampel, Bernd Eckoldt</i>	93
Pont Lagunaire, Togo – Experimentelle Tragwerksanalyse einer Stahlfachwerkbrücke zum Nachweis der Restnutzungszeit <i>Marc Gutermann, Werner Malgut, Klaus Ammermann</i>	103
Experimenteller Nachweis der Tragfähigkeit an der Kettenbrücke im Goethepark in Weimar <i>Erik Meichsner, Phillip Johann Jung, Oliver Hahn, Stefan Finke</i>	117
Untersuchungen und Maßnahmen an setzungsauffälligen Pfeilern der Saale-Elster-Talbrücke der Eisenbahnstrecke Erfurt–Leipzig/Halle <i>André Koletzko, Sandra Christein</i>	123
Bewertung bestehender Brücken unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung durch Bauwerksmonitoring <i>Nico Steffens, Karsten Geißler, Ronald Stein</i>	135

Lagrange-Multiplikator-Test zur Detektierung von zunehmender Strukturschädigung:
Experimentelle Verifikation

*Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Werner Daum,
Detlef Hofmann, Frank Basedau* 147

Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen mithilfe der dynamischen Eigenschaften

F. Weisleder, M. Waltering..... 159

Softwareunterstützte Nachrechnung und Ertüchtigung von Brückenbauwerken

Stefan Kimmich, Eckhard Held 175

Identifikation dynamischer Strukturparameter von Eisenbahnbrücken mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie

Jens Schneider¹, Matthias Becker²,
Andrei Firus³, Jiny Pullamthara⁴, Michael Drass³

Kurzfassung. Die terrestrische Mikrowelleninterferometrie bietet die Möglichkeit, Deformationen von Objekten mit einer Genauigkeit von bis zu 0,01 mm bei einer hohen Abtastrate ohne jegliche Instrumentierung der zu messenden Struktur zu messen. Die hohe Abtastrate ermöglicht eine genaue Erfassung des Schwingungsverhaltens des zu untersuchenden Objekts und somit die Ableitung der modalen Strukturparameter. Dieser Beitrag untersucht die Anwendbarkeit des Messverfahrens für Eisenbahnbrücken. Die Validierung der Messmethode wurde durch konventionelle Vergleichsmessungen durchgeführt.

Identification of dynamic structural parameters of railway bridges by means of terrestrial microwave interferometry – Abstract. *Terrestrial microwave interferometry is a modern measuring method, which allows deformation measurements with an accuracy of up to 0,01 mm at a sampling rate of up to 4000 Hz. Due to the high sampling frequency, the vibration behavior of the measured object can be captured accurately and its main modal parameters can thus be directly determined. This paper investigates the applicability of this measuring technique in case of railway bridges. For this, measurements of a railway bridge were performed. Their validation was made through parallel measurements with conventional sensors.*

1. Einleitung

Die Identifikation dynamischer Struktureigenschaften ist ein wichtiger Aspekt in der Überwachung bestehender Tragwerke und in der Beurteilung ihrer Tragfähigkeit. Sie äußern sich im Bewegungs- und Schwingungsverhalten des Bauwerkes und werden anhand von dynamisch gemessenen Bewegungsgrößen abgeleitet. Konventionelle Messverfahren, wie zum Beispiel Beschleunigungsmessungen mittels piezometrischer Beschleunigungsaufnehmer oder Verformungsmessungen mit induktiven Wegsensoren setzen einen großen arbeitstechnischen Aufwand voraus, da die Sensoren meistens direkt an die Struktur angebracht werden müssen, wobei es für manche Bauwerke wegen der schlechten Zugänglichkeit überhaupt keine Untersuchungsmöglichkeit gibt. Des Weiteren können konventionelle Sensoren nur punktuell angebracht werden, was zu wesentlichen Einschränkungen führt, wenn die Bewegung der gesamten Struktur erfasst werden soll.

Die terrestrische Mikrowelleninterferometrie (MI) bietet hier die Möglichkeit, Deformationen von gesamten Strukturen mit einer Genauigkeit bis in den Submillimeterbereich bei einer Abtastrate

1 Prof. Dr.-Ing., TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion

2 Prof. Dr.-Ing., TU Darmstadt, Institut für Geodäsie

3 M.Eng., TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion

4 M.Sc., TU Darmstadt, Institut für Geodäsie

von bis zu 4000 Hz und einer sehr hohen räumlichen Auflösung berührungslos zu erfassen. Durch die sehr hohe Abtastrate ermöglicht diese Methode auch eine genaue Erfassung des Schwingungsverhaltens des zu untersuchenden Objekts und somit die Ableitung seiner modalen Kennwerte. Darüber hinaus ist das Messverfahren auch im laufenden Betrieb einsetzbar, da die zu messende Struktur weder begangen noch instrumentiert werden muss. Das stellt einen wesentlichen Vorteil dar, vor allem bei der Untersuchung von Eisenbahnbrücken, deren Instrumentierung mit traditionellen Messsystemen zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen oder Sperrpausen der Eisenbahntrassen erfordert. Dieser Beitrag untersucht die Anwendbarkeit dieses Messverfahrens für Eisenbahnbrücken anhand eines konkreten Beispiels. Die Validierung der Ergebnisse durch parallele Vergleichsmessungen mit konventionellen Sensoren wird ebenfalls vorgestellt.

2. Mikrowelleninterferometrie

2.1 Messprinzip

Das Grundprinzip der Bewegungserfassung mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie beruht auf der Messung der Amplitude und Phase der elektromagnetischen Welle, die von dem Radargerät (Mikrowelleninterferometer) ausgesendet und an dem zu messenden Objekt reflektiert wird [1]. Der Zusammenhang zwischen der Objektbewegung Δr_{disp} und der interferometrischen Phase Φ , d. h. die Differenz der Phase zweier Messungen, ist gegeben in Abhängigkeit der Wellenlänge λ der ausgesendeten Mikrowelle durch:

$$\phi = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta r_{disp} \quad (1)$$

Da die interferometrische Phase Φ immer im Bereich $-\pi$ bis $+\pi$ (d. h. $-\lambda/4$ bis $+\lambda/4$ aufgrund der doppelten Wegstrecke) liegt, kann sie unter Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren wie folgt formuliert werden:

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

Hierbei ist ϕ_{disp} die der geometrischen Streckenänderung in Blickrichtung entsprechende Phasenverschiebung, ϕ_{atm} die atmosphärisch bedingte Phasendifferenz, ϕ_{noise} das Rauschen und n die Phasenmehrdeutigkeit, da nur das Phasenreststück messbar ist und nicht die ganzzahlige Anzahl von Wellendurchläufen. Die atmosphärischen Einflüsse sind allerdings bei dynamischen Messungen (kurze Zeitintervalle) sehr gering und können daher in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Die Phasenmehrdeutigkeit, d. h. die Anzahl von Phasendurchgängen, kann nur unter verschiedenen Annahmen bestimmt werden. Hinsichtlich der Verschiebungen wird meistens davon ausgegangen, dass sie zwischen zwei Abtastungen ein Viertel der Wellenlänge nicht übersteigen ($\pm\lambda/4 = 4,4 \text{ mm}$, $\lambda = 17,4 \text{ mm}$).

2.2 Mikrowelleninterferometer

Die Radargeräte IBIS und FastGBSAR (Bild 1) sind zwei kommerziell angebotene Mikrowelleninterferometer. Sie können in zwei Versionen betrieben werden: nämlich mit Radar mit synthetischer Apertur (Synthetic Aperture Radar, SAR) und mit Radar mit echter Apertur (Real Aperture Radar, RAR). Der Betrieb im RAR-Modus ermöglicht Messungen von Bewegungen



Bild 1: Radargeräte: IBIS (links) und FastGBSAR (rechts)

entlang eines Profils, während die SAR-Technologie zur Erfassung flächenhafter Bewegungen großer Strukturen angewendet wird. Im Folgenden werden nur Anwendungen im RAR-Modus betrachtet.

Die Sendeantenne eines MI-Geräts, das auf einem Stativ montiert wird, sendet kontinuierlich Mikrowellen im Bereich von 17,2 GHz (KU-Band, 17,4 mm Wellenlänge) aus, die am zu messenden Objekt reflektiert und von dem Gerät durch die Empfangsantenne wieder empfangen werden. Die gemessenen Bewegungen sind eindimensional, d. h. nur in Blickrichtung des Geräts. Daher ist eine sinnvolle Aufstellung des Radars in Abhängigkeit der zu erwartenden Bewegungsrichtung auszuwählen. Die gemessenen Bewegungen in Blickrichtung Δr können dann auf die wahre Bewegungsrichtung Δx nach Gleichung (3) projiziert werden (Bild 2).

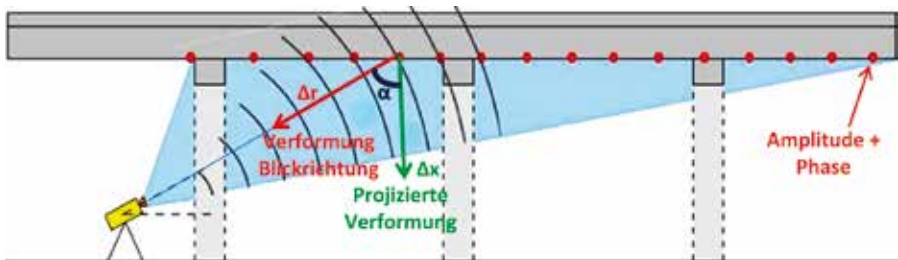


Bild 2: Typische Messsituation mit einem Mikrowelleninterferometer

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos(\alpha)} \quad (3)$$

Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und der hohen Genauigkeit kann das Mikrowelleninterferometer gleichzeitig mehrere Messpunkte unter gleichem Zeitstempel analysieren und auswerten. Das stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber vielen konventionellen Messsystemen dar. Darüber hinaus ermöglicht die MI-Technologie eine Durchführung von Messungen unabhängig von Tageslicht und Wetter.

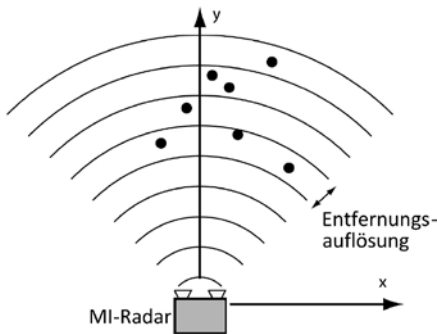


Bild 3: Räumliches Auflösungsvermögen eines Mikrowelleninterferometers

Die Qualität des reflektierten Signals wird hauptsächlich durch die Reflektivität des zu messenden Objekts beeinflusst. Stahl- und Betonkanten weisen ein besonders gutes Reflexionsvermögen auf, während glatte Oberflächen aufgrund der überwiegenden Vorwärtsreflexion als schlechte Reflektoren eingestuft werden. Darüber hinaus können die Radargeräte im RAR-Modus nur zwischen Punkten verschiedener Entfernung unterscheiden (Bild 3). Punkte, die in dieselbe Auflösungszelle fallen, überlagern sich und können nicht voneinander getrennt werden. Daher ist bei der Wahl des Standpunktes und der Ausrichtung des Messgeräts die Vermeidung von Punktüberlagerungen zu berücksichtigen [2].

Die Entfernungsauflösung bei MI-Radargeräten wird durch Anwendung der SFCW-Technik (Stepped Frequency Continuous Wave) erzielt [3]. Der Zusammenhang zwischen der Auflösung im Ortsraum δ_r , der Bandbreite B und der Lichtgeschwindigkeit c ist durch Gl. (4) gegeben:

$$\delta_r = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (4)$$

Somit erhält man mit einer maximalen Bandbreite von 200 MHz eine Auflösung von 0,75 m in Blickrichtung.

In der Tabelle 1 werden die relevanten Spezifikationen der zwei genannten Mikrowelleninterferometer dargestellt. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass eine Abtastrate von 200 Hz für Anwendungen in der Brückendynamik ausreichend ist, da die erste zu erwartende Eigenfrequenz, die meistens die Schwingungsantwort dominiert, in der Regel unter 20 Hz liegt.

Tabelle 1: Spezifikationen von IBIS-S und FastGBSAR

Spezifikation	IBIS-S	FastGBSAR
Frequenz [GHz]	17,2	
Wellenlänge [mm]	17,4	
Bandbreite [MHz]	bis zu 200	
Entfernungsauflösung [m]	0,75	
Genauigkeit [mm]	0,01 bis 0,1	
Maximalentfernung [m]	1000	4000
Abtastrate [Hz]	bis zu 200	bis zu 4000

Eine ausführlichere Übersicht über das Messprinzip und die Funktionsweise der Mikrowelleninterferometer geben *Bernadi et al.* [1] und *Rödelsperger et al.* [4]. Mehrere Anwendungsbeispiele werden in [4] und [5] vorgestellt.

3. Untersuchungen an einer Eisenbahnbrücke

3.1 Messobjekt und Messlayout

Zur Bestätigung der Praxistauglichkeit der Mikrowelleninterferometrie für baudynamische Messungen wurden experimentelle Untersuchungen an einer Eisenbahnbrücke im laufenden Betrieb durchgeführt. Gemessen wurden parallel Deformationen mit dem Mikrowelleninterferometer IBIS-S und mit konventionellen induktiven Wegsensoren sowie Beschleunigungen mit Servo-Beschleunigungsaufnehmern.

Die gemessene Struktur ist eine Vollwandträgerbrücke aus Stahl mit einer Spannweite von 16,4 m, die aus zwei baugleichen entkoppelten Teilbauwerken (TBW) besteht. Vom statischen System her handelt es sich um zwei parallele Einfeldträger, s. Bilder 4 und 5. Die Instrumentierung der Struktur für die zwei Messaufbauten ist in Bild 5 dargestellt. Der wesentliche Unterschied zwischen den zwei Messanordnungen ist die Aufbringung von Winkelreflektoren in dem ersten Aufbau. Somit soll auch der Einfluss der Reflektoren auf die Messgenauigkeit des MI-Radars analysiert werden.

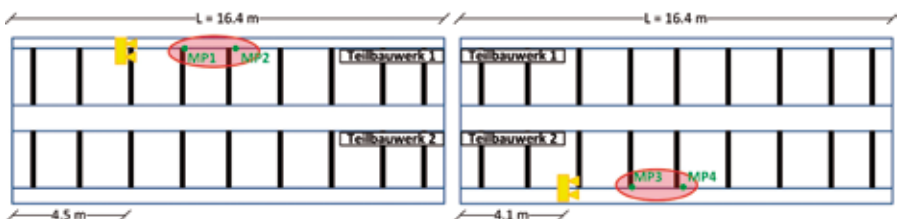


Bild 4: Messaufbau 1 (links) und Messaufbau 2 (rechts) – Draufsicht

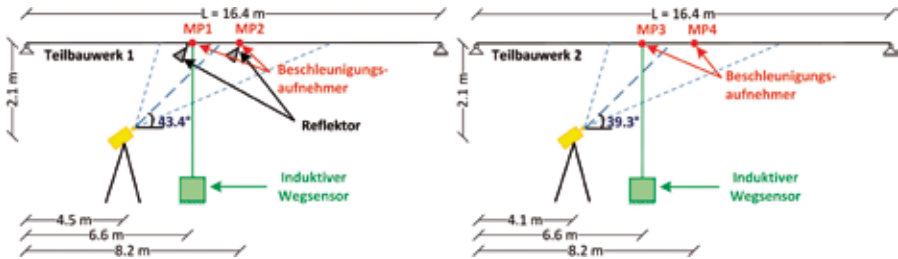


Bild 5: Messaufbau 1 (links) und Messaufbau 2 (rechts) – Seitenansicht

3.2 Ergebnisse und Vergleich mit konventionellen Messsensoren

3.2.1 Allgemeines

Werden Zeitverläufe verschiedener Messungen verglichen, müssen die Messdaten in Verbindung mit dem jeweiligen Zeitvektor zeitsynchron vorliegen. Bei den hier zu vergleichenden Messsystemen ist dies jedoch messtechnisch nicht möglich, weil sie keine interne Steuerung der Uhren besitzen und mit unterschiedlichen Softwareprogrammen bedient werden. Die Zeitsynchronisation muss in erster Linie den zeitlichen Versatz der Startpunkte ermitteln und unterdrücken. Das geschah durch Programmierung einer Funktion, die die ersten lokalen Extrema der zu vergleichenden Zeitreihen findet. Die Zeitpunkte dieser Maxima wurden verglichen und für die Synchronisation benutzt.

3.2.2 Verschiebungen

Für jeden Aufbau wurden Messungen bei mehreren Zugüberfahrten durchgeführt. Bild 6 zeigt exemplarisch einen mit dem Mikrowelleninterferometer IBIS-S am Teilbauwerk 1 gemessenen Verformungszeitverlauf infolge der Überfahrt eines Hochgeschwindigkeitszuges (ICE 3, 14:27 Uhr, s. Tabelle 2). Die dabei verwendete Abtastrate betrug 125,2 Hz.

An den Punkten MP1 und MP3 wurden die Verformungen auch mit konventionellen Wegsensoren erfasst (Abtastrate 600 Hz). Bild 7 zeigt beispielsweise die Überlagerung der in Bild 6 dargestellten Verformung (MP1) mit der mit einem induktiven Wegsensor gemessenen Verformung an derselben Stelle für die gleiche Zugüberfahrt. Das bei dem Vergleich entstandene Residuum ist gering (vgl. Tabelle 2).

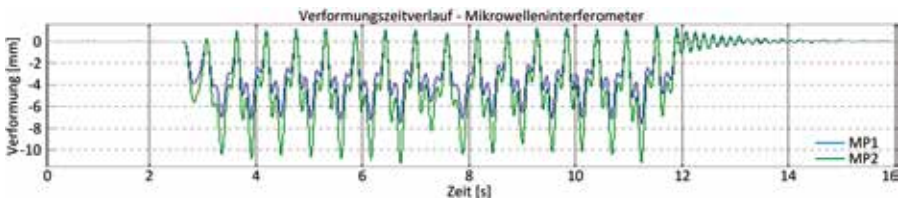


Bild 6: Gemessene Verformungen: MI-Radar IBIS-S (Überfahrt ICE 3)

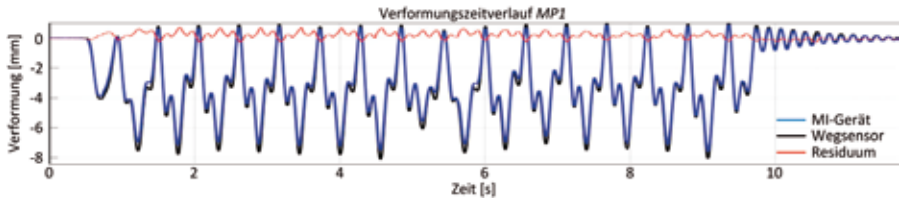


Bild 7: Deformationsmessungen: MI-Radar und induktiver Wegsensor (synchronisierte Zeitvektoren) sowie Residuum

Tabelle 2: Maximale Verformungen am Teilbauwerk 1

Zugüberfahrt	Maximale Verformung [mm]			
	MP 1			MP 2
	MI-Radar	Wegsensor	Differenz MI-Wegsensor	MI-Radar
1 (IC 14:09)	7,15	7,89	-0,74	10,90
2 (ICE3 14:15)	6,06	6,57	-0,51	8,86
3 (RE 14:18)	7,12	7,85	-0,73	10,68
4 (ICE3 14:27)	7,61	8,14	-0,53	11,22
5 (ICE3 14:31)	7,47	8,13	-0,66	11,23
Mittelwert			-0,63	
Standardabweichung			0,10	

Tabelle 3: Maximale Verformungen am Teilbauwerk 2

Zugüberfahrt	Maximale Verformung [mm]			
	MP 3			MP 4
	MI-Radar	Wegsensor	Differenz MI-Wegsensor	MI-Radar
1 (ICE 12:48)	8,10	7,14	0,96	11,38
2 (RE 12:56)	8,74	7,81	0,93	12,46
3 (IC 12:58)	8,23	7,36	0,87	11,66
4 (RE 13:08)	8,74	7,75	1,00	12,03
Mittelwert			0,94	
Standardabweichung			0,05	

In den Tabellen 2 und 3 sind die maximalen gemessenen Verformungen für alle Zugüberfahrten aufgeführt. Zusätzlich wird ein Vergleich zwischen den gemessenen maximalen Verformungen mittels MI-Technologie und induktiver Wegsensoren für die Punkte MP1 und MP3 angestellt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung.

3.2.3 Eigenfrequenzen

Eine Ermittlung der Eigenfrequenzen von Brückenbauwerken aus den Signalen bei Zugüberfahrt ist nicht empfehlenswert, da sich bei der Zugüberfahrt eine erzwungene Schwingung mit Zusatzmasse einstellt. Die zusätzliche Masse führt zu scheinbar niedrigeren Eigenfrequenzen des Brückenbauwerks [7]. Die Eigenfrequenzermittlung erfolgt daher durch Fast Fourier Transformation (FFT) des Signals des Ausschwingvorgangs (nach Zugüberfahrt) in den Frequenzbereich (Bild 8). In den Bildern 8 und 9 werden exemplarisch Frequenzspektren von allen verwendeten Messmethoden dargestellt. Bei einer genaueren Betrachtung der Bilder 8 und 9 ist zu erkennen, dass das Beschleunigungsspektrum noch kleine Spitzen bei den höheren Eigenfrequenzen enthält, die in den Verformungsspektren nur erahnt werden können oder gar nicht sichtbar sind. Das ist auf die Proportionalität der Beschleunigung mit der Verformung über das Quadrat der Eigenkreisfrequenz zurückzuführen und verdeutlicht, dass Schwingungen mit hohen Frequenzen sehr geringe Wegamplituden aufweisen. Daher sind die höheren Eigenformen i. d. R. für die Ermittlung der Gesamtbeanspruchung des Tragwerks vernachlässigbar [8].

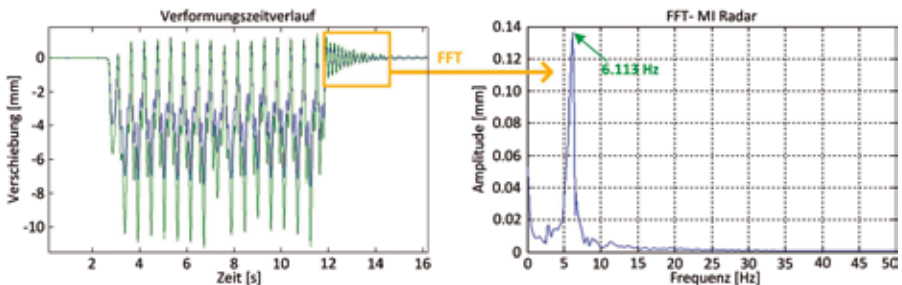


Bild 8: Mit MI-Radar am MP1 gemessene Verformungen (links) und daraus abgeleitetes Frequenzspektrum (rechts, Überfahrt ICE 3)

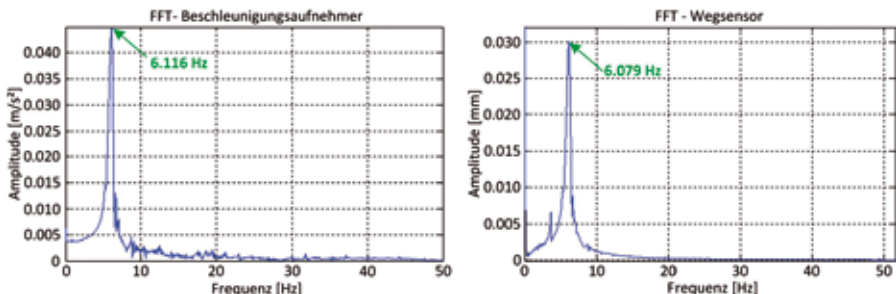


Bild 9: Frequenzspektren der konventionellen Sensoren (MP1, Überfahrt ICE 3)

Den Vergleich zwischen den infolge mehrerer Zugüberfahrten ermittelten Eigenfrequenzen zeigen die Tabellen 4 und 5. Eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse ist ersichtlich.

Tabelle 4: Eigenfrequenzen des Teilbauwerks 1

Zugüberfahrt	Eigenfrequenz [Hz]				
	MP 1			MP 2	
	MI-Radar	Weg-sensor	Beschleunigungs-aufnehmer	MI-Radar	Beschleunigungs-aufnehmer
1 (IC 14:09)	6,72	6,68	6,72	6,72	6,74
2 (ICE3 14:15)	6,36	6,46	6,46	6,48	6,52
3 (RE 14:18)	6,36	6,34	6,37	6,36	6,37
4 (ICE3 14:27)	6,11	6,08	6,12	6,11	6,12
5 (ICE3 14:31)	6,11	6,12	6,13	6,11	6,13
Mittelwert	6,33	6,34	6,36	6,36	6,38
Standardabweichung	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26

Tabelle 5: Eigenfrequenzen des Teilbauwerks 2

Zugüberfahrt	Eigenfrequenz [Hz]				
	MP 3			MP 4	
	MI-Radar	Weg-sensor	Beschleunigungs-aufnehmer	MI-Radar	Beschleunigungs-aufnehmer
1 (ICE 12:48)	6,85	6,79	6,85	6,85	6,85
2 (RE 12:56)	6,85	6,74	6,77	6,85	6,77
3 (IC 12:58)	6,85	6,83	6,98	6,85	6,98
4 (RE 13:08)	6,85	6,68	6,77	6,85	6,77
Mittelwert	6,85	6,76	6,84	6,85	6,84
Standardabweichung	0,00	0,06	0,09	0,00	0,09

3.2.4 Dämpfungsmaße

Um modale Dämpfungen bestimmen zu können, ist es zunächst erforderlich, das Signal in einzelne Frequenzen zu zerlegen. Dies erfolgte durch Anwendung von Bandpassfiltern. Danach wurde die Ermittlung der modalen Dämpfungsmaße ξ mit Anwendung der Gleichung (5) und dem Ablesen der Amplituden x_n und x_{n+m} aus dem Signal in Abhängigkeit der gewählten Periodenzahl m durchgeführt (Bild 10).

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot m} \cdot \ln \left(\frac{x_n}{x_{n+m}} \right) \quad (5)$$

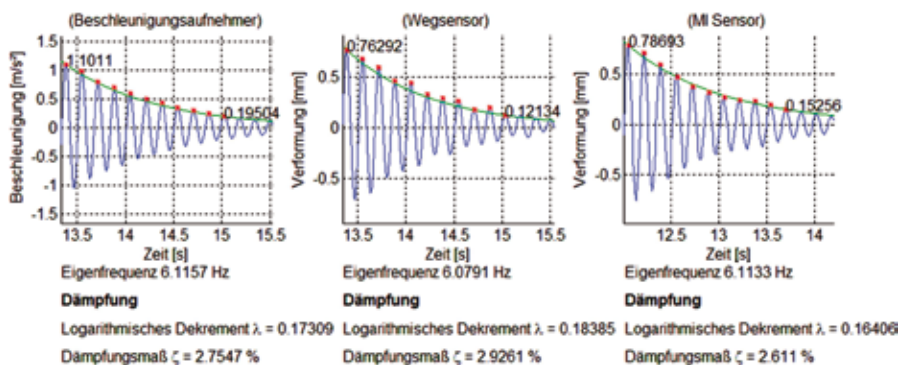


Bild 10: Dämpfungsermittlung ($m = 10$) infolge der Überfahrt eines ICE 3 (Messungen am Punkt MP1)

Der Vergleich der Dämpfungsmaße ermittelt durch Auswertung der mit unterschiedlichen Sensorarten erfassten Signale wird in den Tabellen 6 und 7 dargestellt. Hier erkennt man wiederum eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Tabelle 6: Dämpfungsmaße des Teilbauwerks 1

Zugüberfahrt	Dämpfungsmaß [%]				
	MP 1			MP 2	
	MI-Radar	Weg-sensor	Beschleunigungs-aufnehmer	MI-Radar	Beschleunigungs-aufnehmer
1 (IC 14:09)	Ausschwingphase nicht erkennbar			Ausschwingphase nicht erkennbar	
2 (ICE3 14:15)	2,50	2,39	2,04		
3 (RE 14:18)	2,67	2,53	2,60	2,47	2,30
4 (ICE3 14:27)	2,59	2,86	2,63	2,62	2,79
5 (ICE3 14:31)	2,53	3,10	2,71	2,78	2,84
Mittelwert	2,57	2,72	2,49	2,62	2,64
Standardabweichung	0,08	0,32	0,31	0,15	0,30

Tabelle 7: Dämpfungsmaße des Teilbauwerks 2

Zugüberfahrt	Dämpfungsmaß [%]				
	MP 3			MP 4	
	MI-Radar	Weg-sensor	Beschleunigungs-aufnehmer	MI-Radar	Beschleunigungs-aufnehmer
1 (ICE 12:48)	1,83	1,30	2,19	2,32	1,82
2 (RE 12:56)	1,91	2,36	1,51	1,87	1,71
3 (IC 12:58)	Ausschwingphase nicht erkennbar				
4 (RE 13:08)	1,85	1,39	1,45	2,12	2,23
Mittelwert	1,87	1,68	1,72	2,10	1,92
Standardabweichung	0,04	0,59	0,41	0,22	0,27

3.2.5 Differenzierte Verschiebungen und gemessene Beschleunigungen

Um die MI-Messung mit den gemessenen Beschleunigungen vergleichen zu können, muss diese zweimal nach der Zeit differenziert werden. Da es sich um numerische Werte handelt und keine mathematisch beschreibbare Funktion vorliegt, muss eine numerische Differentiation durchgeführt werden, welche in jedem Punkt auf der Zeitachse die Steigung der Geraden zwischen zwei nacheinander folgenden Wegwerten berechnet. Einmalige Differentiation liefert Geschwindigkeitswerte. Eine weitere Berechnung der Steigung zwischen den Geschwindigkeitswerten liefert Beschleunigungsdaten. Diese lassen sich dann mit den Daten der Messung des Beschleunigungsaufnehmers vergleichen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die mit konventionellen Sensoren durchgeführten Messungen nochmals mit einem Tiefpassfilter (Butterworth, 10. Ordnung) versehen, da der Frequenzgehalt dieser Messungen aufgrund der höheren Abtastrate viel breiter ist. Die angewandte Grenzfrequenz ist gleich der Hälfte der Abtastrate des MI-Geräts. Bild 11 zeigt einen Vergleich zwischen den zweimal differenzierten Verformungszeitverläufen und dem dazugehörigen gemessenen Beschleunigungszeitverlauf. Hierbei ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

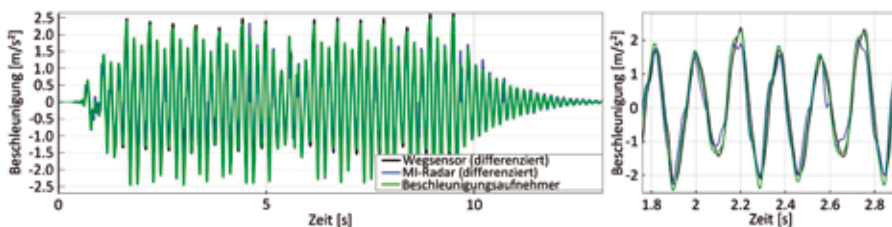


Bild 11: Vergleich: differenzierte Verformungen und gemessene Beschleunigung (MP1, Überfahrt ICE3); rechts: Detaildarstellung der Messwerte im Zeitintervall 1,8...2,9 s

3.2.6 Integrierte Beschleunigungen und gemessene Verformungen

In einer Zeitreihe eines Beschleunigungsaufnehmers liegt keine herkömmliche zu integrierende Funktion vor, deswegen müssen numerische Integrationsverfahren benutzt werden. Dafür wurde in dieser Untersuchung die Trapezregel angewendet [9], die die Wegwerte aus den vorangegangenen Werten nach Gleichung (6) rekursiv berechnet:

$$y_{i+1} = \Delta t^2 \cdot a_i - y_{i-1} + 2 \cdot y_i \quad (6)$$

Hierbei ist Δt die Abtastzeit, a_i und y_i stellen die gemessenen Beschleunigungen bzw. die gesuchten Wegwerte dar. Die Anfangswerte y_0 und y_1 werden nach diesem Ansatz zunächst willkürlich festgelegt ($y_0 = y_1 = 0$). Diese willkürliche Festlegung führt allerdings zu erheblichen Verfälschungen der ermittelten Wegwerte [10]. Um diese Einflüsse zu eliminieren bzw. zu minimieren, wurde eine ausgleichende Parabel errechnet, die von den berechneten Wegwerten abgezogen wurde. Das damit erhaltene Ergebnis kann allerdings einen langwelligen Trend beinhalten, der durch eine Mittelwertfilterung (IIR) unterdrückt werden kann.

Darüber hinaus setzt sich die Gesamtverformung einer Eisenbahnbrücke aus einem quasi-statischen und einem dynamischen Anteil zusammen (s. Bild 12). Die Aufteilung der gemessenen Verformungen erfolgt durch die Anwendung eines Tiefpassfilters (Grenzfrequenz 1 Hz) für den statischen Anteil und eines Hochpassfilters (Grenzfrequenz 1 Hz) für den dynamischen Anteil.

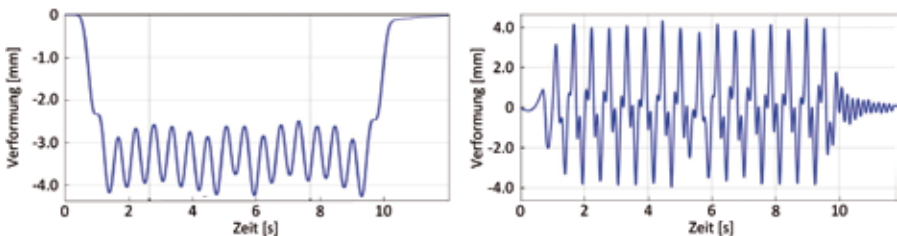


Bild 12: Aufteilung der Verformung: quasi-statischer Anteil (links) und dynamischer Anteil (rechts)

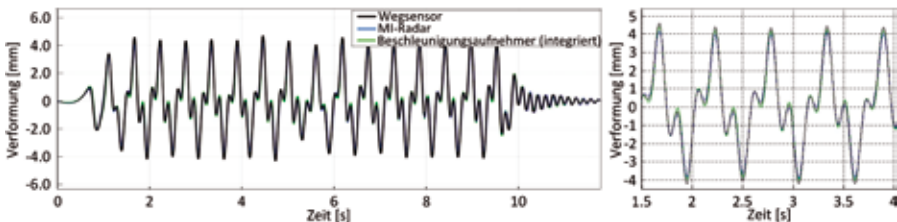


Bild 13: Vergleich zwischen integrierter Beschleunigung und gemessenen Verformungen (MP1, Überfahrt ICE3); rechts: Detaildarstellung im Zeitintervall 1,5...4 s

Die Beschleunigungsaufnehmer können allerdings nur dynamische Anteile der Bewegung erfassen. Das erklärt sich durch das Verschwinden der quasi-statischen Anteile der Verformung bei der zweimaligen Differentiation nach der Zeit. Daher ist es erforderlich, nur die dynamischen Anteile des gemessenen Verformungszeitverlaufs mit der doppelt integrierten Beschleunigung zu vergleichen. Bild 13 zeigt, dass die unter Beachtung der obigen Zusammenhänge integrierte Beschleunigung sehr gut mit dem dynamischen Anteil der gemessenen Verformung übereinstimmt.

4. Schlussbemerkungen

In diesem Beitrag wurde eine Untersuchung der Anwendbarkeit der Mikrowelleninterferometrie für Messungen an Eisenbahnbrücken im laufenden Betrieb vorgestellt. Dafür wurden Bewegungsgrößen an einer Eisenbahnbrücke mit dem MI-Gerät IBIS-S sowie mit konventionellen Sensoren parallel gemessen und daraus die modalen Strukturparameter abgeleitet. Die Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit konventionellen Messverfahren bestätigen die hohe Qualität der Ergebnisse des MI-Radars IBIS-S. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die MI-Messungen auch ohne an der Struktur aufgebrachte Winkelreflektoren eine sehr gute Übereinstimmung mit den konventionellen Messungen und Messungen mit Reflektoren aufweisen. Dies bedeutet, dass die MI-Technik ein sehr großes Potential für schwer zugängliche Bestandsbauwerke hat und bei Eisenbahnbrücken ohne Sperrpausen angewendet werden kann.

Es konnte auch gezeigt werden, dass sich aus den Verformungen direkt Beschleunigungen durch zweimalige Differentiation berechnen lassen, die mit den gemessenen Beschleunigungen sehr gut übereinstimmen. Ähnlich konnten auch die dynamischen Anteile der Verformung durch zweimalige Integration der gemessenen Beschleunigungen mit hoher Genauigkeit ermittelt werden.

Bei der vorgestellten Parallelmessung wurde das MI-Gerät in der vertikalen Ebene direkt unter dem zu messenden Bauteil aufgestellt. Eine solche Aufstellmöglichkeit gibt es allerdings eher selten. Daher sind weitergehende Untersuchungen im Vergleich zu konventionellen Messverfahren vorgesehen, die eine versetzte Aufstellung des MI-Geräts, z. B. quer oder schräg zur Vertikalebene des gemessenen Bauteils, untersuchen.

Darüber hinaus ist auch eine Validierung der Messungen mit dem MI-Radar FastGBSAR durch parallele konventionelle Messungen geplant. Somit könnten die auf dem Markt verfügbaren Mikrowelleninterferometer unter dem Aspekt der Ergebnisqualität für Brückenbauwerke im Vergleich gesetzt werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Bernardini, G.; De-Pasquale, G.; Bicci, A.; Marra, A.; Coppi, F.; Ricci, P.; Pieraccini, M.: Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests. In: Proceedings of EVACES ,07 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. Porto, Portugal, 2007.
- [2] Rödelisperger, S.; Läufer, G.; Gerstenecker, C.; Becker, M.: Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L. Journal of Applied Geodesy 4 (2010) 1, S. 41–54.

- [3] Taylor, J. D. (Hrsg.): Ultra-wideband radar technology. CRC Press, 2001.
- [4] Rödelsperger, S.; Läuffer, G.; Gerstenecker, C.; Becker, M.: Terrestrische Mikrowelleninterferometrie – Prinzip und Anwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN) 10 (2010) 10, S. 324–333.
- [5] Schneider, J.; Becker, M.; Läuffer, G.; Hilcken, J.: Monitoring of Dynamic Properties of Bridges by Terrestrial Microwave Interferometry. In: K. Sugiura (Hrsg.): GJBS 2012 – Proceedings of the 9th German-Japanese Bridge Symposium, Vol. of abstracts, Kyoto (Japan), 10./11.9.2012, S. 59–61.
- [6] Schneider, J.; Becker, M.; Läuffer, G.; Boxheimer, K.; Dietz, S.: Mikrowellen-Interferometrie zur Strukturanalyse und Bauwerksüberwachung von Tragstrukturen. In: Krieger, J.; Isecke, B. (Hrsg.): 1. Brückenkolloquium: Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken. Ostfildern, 24.–26.6.2014, S. 201–205.
- [7] Arsenal Research, Richtlinie: Dynamische Messungen von Eisenbahnbrücken, 2007 (http://www.regelplanung.at/B45/Dynamische_Messung_von_Eisenbahnbruecken.pdf).
- [8] Spengler, M.: Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr: Entwicklung eines Antwortspektrums zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion. Diss., TU Darmstadt, 2010.
- [9] Schwarz, W.: Untersuchung zum Schwingungsverhalten von Brückenbauwerken mittels Laserinterferometer. In: VDI-Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Fachtagung Baudynamik Kassel, VDI-Berichte Nr. 1941, Düsseldorf: VDI Verlag, 2006, S. 155–168.
- [10] Neitzel, F.; Schwanebeck, T.; Schwarz, W.: Zur Genauigkeit von Schwingungsmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren. Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN) 7 (2007) 6, S. 1–14.