Realisierung und Analyse von Schwingungsmessungen in Rahmen des Monitorings am Beispiel eines Brückenbauwerkes in Armenien

Boris Resnik

Einführung

Die Realisierung und abschließende Analyse von Schwingungsmessungen bei der Überwachung von Bauwerken gehören zum so genannten „Structural Health Monitoring“ (SHM) und erweitern somit erheblich die klassischen geodätischen Deformationsmessungen [4]. Dieser Begriff deutet darauf hin, dass heute ein erweitertes Verständnis über die Untersuchungsobjekte gefordert wird und nur in einem interdisziplinären Kontext eine Beurteilung des „Gesundheitszustandes“ des Bauwerkes überhaupt möglich ist.

Der wichtige Unterschied des SHM zu den klassischen geodätischen Überwachungsmessungen ist sein Hauptziel und Ergebnis der Untersuchung:

- Bei den klassischen geodätischen Überwachungsverfahren werden die ermittelten Werte nach einer Signifikanzprüfung mit den Grenzwerten verglichen, die aus theoretischen Berechnungen oder praktischen Erfahrung abgeleitet werden.
- Bei dem SHM werden die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (Werte) in der Verbindung mit den äußeren und innern Einflüssen betrachtet. Diese Zustände werden dann miteinander verglichen, um die signifikanten Abweichungen von „normaler“ Reaktion frühzeitig feststellen zu können.

Die Realisierung dieser Art des Monitorings wird in diesem Beitrag am Beispiel des entwickelten Mess- und Auswertesystems veranschaulicht. Da die Beschreibung von mehreren, inzwischen erfolgreich durchgeführten Testmessungen den Umfang des Beitrages sprengen würde, wird hier nur ein typisches Beispiel dieser Art näher behandelt: Monitoring eines Brückenbauwerkes in Armenien im Jahr 2009.

1 Einsatzmöglichkeiten von Schwingungsmessungen im Rahmen des Bauwerksmonitorings

Bei allen komplexen Bauwerken sind unterschiedliche Bewegungen und Verformungen im Laufe der Zeit zu erwarten. Das Erbringen eines quantitativen Nachweises über sie ist die grundlegende Aufgabe geodätischer Überwachungsmessungen. Das Frequenzerhaltungsprinzip von dynamischen Systemen besagt, dass in einer Ausgangsgröße (Deformationen) nur Frequenzen erhalten sein können, die auch im Spektrum des Eingangs (Einflüsse) enthalten sind. Das heißt in jedem konkreten Fall, dass die Methodik der Deformationsmessungen dem Ablauf der Ursachen, wie z. B. Änderung des Eigengewichtes, Kräfte im Gründungsbereich, Temperaturdifferenzen am Bauwerk, Wind, Verkehr usw., angepasst werden muss (Abb. 1).

Bei den üblichen etwa jährlichen Inspektionsmessungen erlauben Festpunkte eines geodätischen Netzes, die Ergebnisse zweier oder mehreren Beobachtungsepochen miteinander zu vergleichen und somit die signifikanten Verformungen des überwachten Objektes über große Zeitintervalle aufzudecken. Die Änderungen der Geometrie im Laufe der Messungen werden dabei meistens nicht berücksichtigt, obwohl eine Messepoche unter Umständen mehrere Tage in Anspruch nehmen kann. Je leichter und eleganter die Bauwerke durch die Verwendung von neuen Materialien und modernen Konstruktionen werden, desto erheblicher können sie sich durch äußere Einflüsse, wie z. B. Temperaturänderungen, in wenigen Stunden oder sogar Minuten verformen. Bei dem gegenwärtigen Stand der Deformationsmessungen spielt die intensive Betrachtung von solch relativ schnellen Deformationen der Baukonstruktionen eine zunehmend wichtige Rolle. Erst die Erfassung von diesem „Normalverhalten“ des Bauwerkes erlaubt es, bei den kontinuierlichen Überwachungsmessungen rechtzeitig erste Gefahrenzeichen zu erkennen und notwendige Maßnahmen zu ergreifen. Sowohl die klassischen Inspektionsmessungen als auch die Erfassung von solchen schnellen Deformationen kann zu den periodischen Messungen zugeordnet werden.

Während die Strukturen der Bauwerke immer feiner und graziler werden, nehmen die Belastungen zum Teil zu. Es ist bekannt, dass besonders schlanke Bauwerke mit niedrigen Eigenfrequenzen bei geringer Dämpfung, unter Umständen auf Grund natürlicher Anregungsquellen, wie z. B. Wind oder Verkehr, in Schwingungen mit großer Amplitude versetzt werden. Aus diesen Gründen wird heutzutage oftmals zusätzlich zu den üblichen Untersuchungen der Statik der Baukonstruktionen auch eine intensive Betrachtung der Dynamik und speziell der möglichen Schwingungen gefordert.

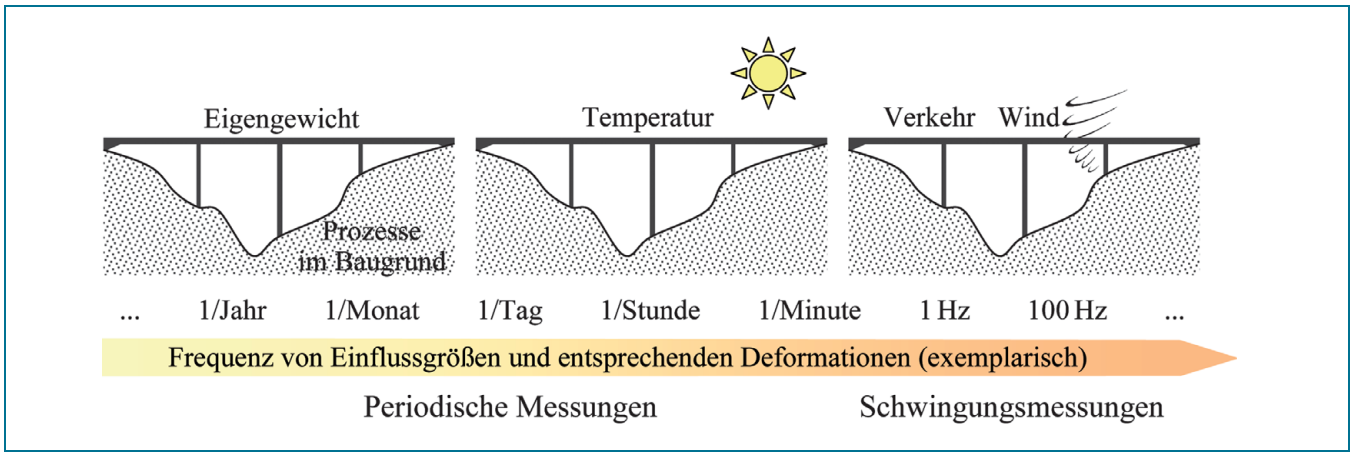

Abb. 1: Monitoring von Bauwerken

Bei der Beschränkung auf die geodätischen Messverfahren mit maximalen Abtastfrequenzen bis etwa 10–20 Hz, wird die Erfassung dieser sehr schnell ablaufenden periodischen Bewegungsvorgänge mit Frequenzen bis etwa 5–10 Hz möglich. Entscheidend für die zutreffende Beurteilung des Bewegungs- und Deformationsverhaltens von Bauwerken ist dabei die Trennbarkeit zwischen den tatsächlich statt gefundenen Deformationen und den Effekten, die durch die Mess- und Auswerteverfahren induziert werden. Die praktischen Erfahrungen mit der Anwendung von geodätischen Geräten wie Tachymeter oder GNSS-Antenne in diesem hochfrequenten Bereich (z. B. [2] und [3]) zeigen, dass die so gewonnenen Ergebnisse oftmals durch starke systematische Einflusse der Atmosphäre usw. verfälscht werden, so dass der zuverlässige Arbeitsbereich auf maximal 3–5 Hz zu begrenzen ist. Es ist bekannt, dass je größer die Spannweite des Bauwerkes, desto kleiner der Wert der ersten Eigenfrequenz ist. Bei großen Bauwerken liegen diese zu bestimmenden Frequenzen innerhalb dieses zuverlässigen Arbeitsbereichs von geodätischen Verfahren. Um ein zutreffendes Bild über das aktuelle Tragsystem zu bekommen, ist es allerdings oftmals erforderlich, auch wesentlich höhere Frequenzen zu betrachten. Solche dynamischen Bauwerksverformungen können am besten mit Beschleunigungsaufnehmern unterschiedlicher Art [1] erfasst werden (Tabelle 1).

2 Realisierung von Schwingungsmessungen

Die Schwingungsmessungen an einem Bauwerk können sowohl periodisch mit abnehmbaren Sensoren, als auch permanent mit fest installierten Messsystemen realisiert werden. Im ersten Fall werden sie in regelmäßigen Abständen durchgeführt und mit den Werten der Basismessung verglichen, wie auch bei Inspektionsvermessungen üblich. Die Kontrollpunkte werden dabei in den charakteristischen Punkten meistens entlang einer Bauachse gewählt und für die wiederholten Messungen vermarkt. Muss ein sensibles Bauwerk oftmals bzw. genauer untersucht werden, so kann in einem oder mehreren von diesen Punkten ein dauerhaft installiertes Messsystem eingesetzt werden. Dieses System zeichnet die Messdaten in frei wählbaren Intervallen auf, die anschließend z. B. über ein Modem abgerufen werden können. Zeigen sich in den Ergebnissen der Untersuchung außergewöhnliche Verschiebungen von Frequenzen, so können deren Ursachen genauer untersucht, sowie entsprechende Korrekturmaßnahmen ergriffen werden. Eine Kontrolle der absoluten Werte von Schwingungsamplituden ist dabei weniger sinnvoll, weil ihre Grenzwerte, von wenigen Ausnahmen abgesehen, gar nicht bekannt sind.
Sowohl in der Zuverlässigkeit als auch hinsichtlich der möglichen Automatisierbarkeit des Messablaufs steckt in den Schwingungsmesssystemen ein sehr großes Potential. Nach der Meinung von vielen Fachexperten kann ihr Einsatz nicht nur beim Monitoring von unikalen, sondern auch bei den üblichen Bauwerken eine sinnvolle und wirtschaftlich vertretbare Alternative zu den anderen Mess-

Tabelle 1: Verfahren beim üblichen Monitoring von Bauwerken (exemplarisch)

Instrument (Verfahren)	Messgenauigkeit	Messfrequenz	Periodische Messungen	Schwingungs-messungen
Digitalnivellier	< 1 mm (h)	unter 0,3 Hz	++	o
Tachymeter	2-3 mm (X,Y,h)	unter 10 Hz	++	+
GNSS	2-10 mm (X,Y,h)	unter 20 Hz	++	+
Neigungssensor	< 0,01 mrad (γ)	unter 10 Hz	++	+
Beschleunigungssensor	< 1 mg (a)	unter 500 Hz	o	++

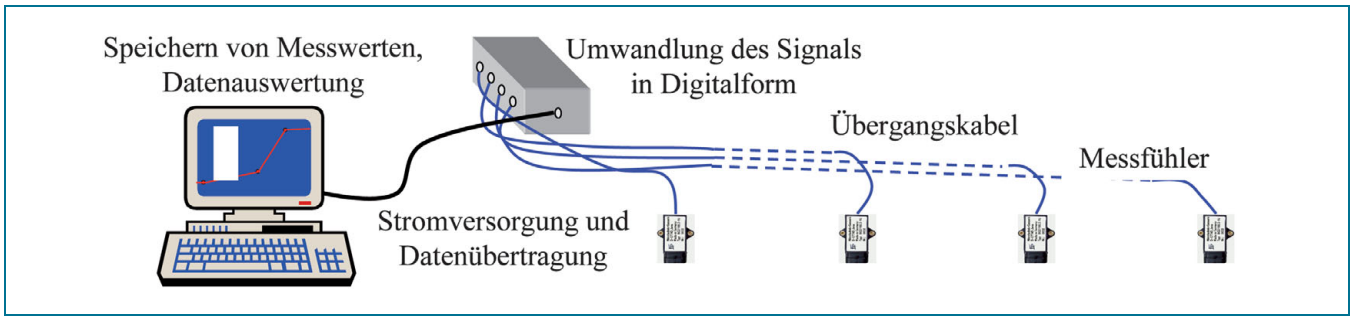

Abb. 2: Messsystem für die dynamischen Untersuchungen von Bauwerken

verfahren sein [4]. Problematisch ist allerdings insbesondere bei der permanenten Kontrolle die Tatsache, dass ein erheblich höherer gerätetechnischer Aufwand erforderlich ist, wenn mehrere dutzend Punkte gleichzeitig beobachtet werden sollen. Die Kosten für einen einzigen Messsensor für die Erfassung von ambienten Schwingungen betragen heutzutage zwischen drei- und fünftausend Euro. Obwohl der erfolgreiche Einsatz einer Vielzahl von solchen automatisch arbeitenden Messsystemen für die permanente Überwachung von gefährdeten unikalen Bauwerken inzwischen mehrfach realisiert wurde, ist eine solche Anwendung für ein übliches Bauwerk bzw. in den ärmeren Regionen der Erde nicht unbedingt wahrscheinlich.

Aus den genannten Gründen wurde vom Autor in den letzten Jahren ein Versuch unternommen, ein alternatives Messsystem für die kostengünstigen dynamischen Untersuchungen von Bauwerken zu entwickeln. Dieses Messsystem besteht aus mehreren einfachen Sensoren, die von den Herstellern für Maschinenbau, Windkraftanlagen usw. konzipiert wurden, einem Empfängermodul und einem Datenlogger (Abb. 2). Die Geräte sind außerordentlich robust und wetterfest. Sie können wegen der geringen Stromaufnahme auch längere Zeit netzunabhängig betrieben werden.

Das konstruktive Hauptmerkmal des verwendeten Messsystems bilden mehrere preiswerte kapazitive Beschleunigungssensoren, die mit Hilfe von Verbindungskabeln mit einer Länge von bis zu 100 Metern und über einen A/D-Wandler mit einem Feldcomputer verbunden werden. Die dabei verwendeten Sensoren haben nach den Herstellerangaben einen Arbeitsbereich von ± 2 g, sowie eine Auflösung von weniger als 1 mg. Obwohl die Messrate je nach Einstellung mehrere kHz betragen kann, werden vom Hersteller Schwingungsmessungen mit Frequenzen bis zu 20 Hz angestrebt. Um an mehreren Messpunkten etwa vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurde das System für eine gleichzeitige Messung mit bis zu acht Sensoren konzipiert. Die spritzwassergeschützte Ausführung aller Module und Verbindungen befähigt dieses Messsystem auch unter schwierigen Umweltbedingungen im Außendienst (Feuchtigkeit, Temperatur, mechanische Beanspruchungen) seine Aufgabe sicher zu erfüllen.

Die verwendeten Sensoren weisen im Vergleich zu den hochempfindlichen kommerziellen geophysikalischen Sensoren eine etwas schlechtere Messgenauigkeit auf und können deswegen nicht z. B. für die Erfassung von Schwingungen auf Grund mikroseismischer Erscheinungen verwendet werden. Die Kosten pro Geräteeinheit mit acht Sensoren und ohne Feldcomputer liegen allerdings in der Größenordnung von Tausend Euro und betragen somit nur einen Bruchteil im Vergleich zu etablierten Messsystemen.

Bei der Realisierung von dynamischen Untersuchungen werden alle Sensoren meistens entlang einer Bauachse positioniert und über einen A/D-Wandler an den Feldcomputer angeschlossen. Zwischen den Messpunkten werden in der Regel zusätzlich die Abstände erfasst (Abb. 3), um die weitere gemeinsame Analyse zu ermöglichen. Obwohl die Endergebnisse der Frequenzberechnungen lediglich bis zu 20 Hz erwarten lassen, wird bei der Datenerfassung eine wesentlich größere Abtastrate von einem kHz gewählt. Um vergleichbare Ergebnisse zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu erreichen, wird die Anzahl der Realisierungen auf 60 000 je Messdatei bzw. auf eine Minute be-

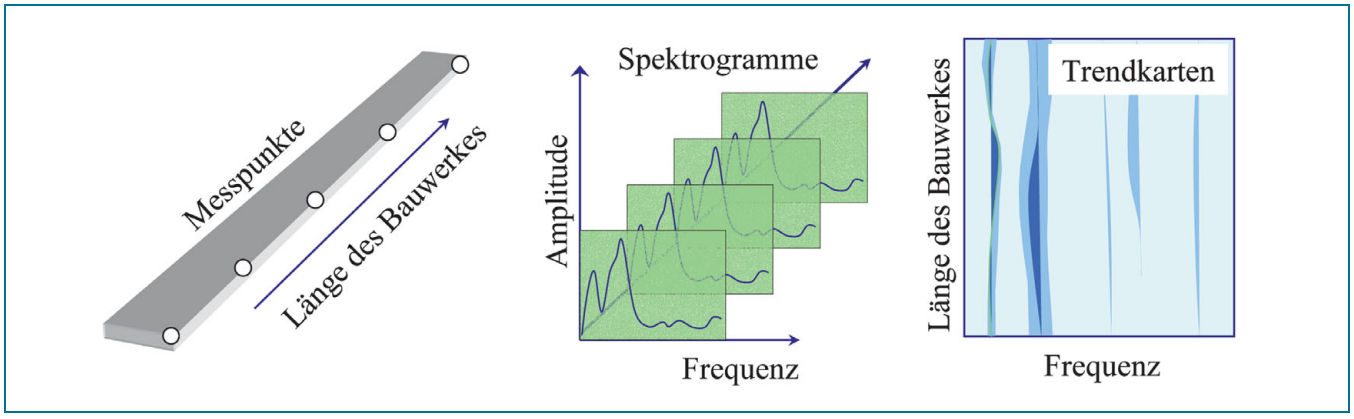

Abb. 3: Realisierung und Analyse von Schwingungsmessungen

grenzt. Diese Einstellungsparameter haben sich bei den meisten Testmessungen gut bewährt. Die erfassten Messdateien werden damit ausreichend lang, um die Verfälschungen durch kurzzeitige Störungen der gezwungenen Schwingungen zu vermeiden. Die Forderung nach etwa gleichen Bedingungen bei allen Messsensoren wird dadurch ebenfalls nicht verletzt. Die Gesamtgröße der gespeicherten Datei beträgt bei der Benutzung aller acht Kanäle etwa 1 MB pro Messvorgang.

3 Realisierung des Auswertekonzeptes

Als Ergebnis einer Schwingungsmessung mit einem Beschleunigungsaufnehmer erhält man eine zeitlich geordnete Folge von Realisierungen, deren Anzahl in wenigen Sekunden leicht mehrere Tausend Werte erreichen kann. Während die Realisierung von Schwingungsmessungen, von Entwicklung und Herstellung der Sensoren abgesehen, in den letzten Jahrzehnten immer einfacher wurde, erfordert ihre Auswertung und folgende Analyse weiterhin umfangreiche mathematische Kenntnisse und kann unter Umständen sehr zeitaufwendig sein. In der Entwicklungsphase des oben beschriebenen Messsystems wurde sie dadurch erschwert, dass dafür keine kommerziellen Computerprogramme verwendet werden konnten und die Autoren auf Softwaremodule eigener Entwicklung angewiesen waren. Die Auswertung bei den ersten Testmessungen wurde deshalb direkt mit dem multifunktionalen Programmsystem MATLAB vorgenommen, das sich bei der Analyse von sehr großen Datenmengen als ein sehr flexibles und schnelles Werkzeug erwiesen hat. Bei den folgenden Projekten bzw. „routinemäßigem“ Verarbeiten von Messdaten wurden die so vorbereiteten Skripte zu einem gemeinsamen selbständigen Programm für eine durchgehende interaktive Auswertung und Analyse der Messergebnisse vereinigt. Da die Beschreibung von allen Arbeitschritten des verwendeten Algorithmus den Umfang des Beitrages sprengen würde, sollen hier nur seine wichtigsten Schritte näher behandelt werden.
Wenn man mit den Schwingungsmessungen konfrontiert wird und eine einfache Vorstellung über ihre Haupteigenschaften erhalten will, ist ihre spektrale Analyse immer der erste Schritt. Führt man die aufgezeichneten Beschleunigungssignale von allen Sensoren aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich über, erhält man mehrere Antwortspektren, deren Energiespitzen bei den Eigenfrequenzen des Bauwerkes liegen (Abb. 3). Um mehrere Spektren zusammen analysieren zu können, bedarf es bereits in der Anfangsphase der Auswertung einer passenden Präsentationsform. Als eine sehr wesentliche Entwicklung in diesem Zusammenhang sind die so genannten Trendkarten anzusehen. Diese Abbildungen stellen mehrere Signale im Frequenzbereich gleichzeitig und in Abhängigkeit von ihrer Lage am Bauwerk dar, wobei aus Gründen der Anschaulichkeit eine zweidimensionale Flächendarstellung gewählt wird. Die Ergebnisse (Frequenzspektren) mehrerer Messungen werden in dieser Darstellung zusammen geschoben und von oben betrachtet. Um die einzelnen Frequenzspitzen unterscheiden zu können, ist eine variable Färbung in Abhängigkeit von den festgestellten Amplituden erforderlich, wodurch der Energiegehalt von einzelnen Frequenzen der Schwingung visuell abgeschätzt werden kann.
Alle erforderliche Arbeitsschritte und Einstellungen können im vorbereiteten Programm (Abb. 4) mit wenigen Schaltknöpfen gesteuert werden, so dass auch eine umfassende Kontrolle direkt nach der Erfassung im Feldcomputer vorgenommen werden kann. Alle Ergebnisse der Auswertung, wie Spektrogramme und Trendkarten, können in unterschiedlichen Formaten für die Dokumentation bzw. weitere Verarbeitung gespeichert werden.

4 Praktische Anwendung des Mess- und Auswertekonzeptes an einem Brückenbauwerk

Bei mehreren Testmessungen im Jahr 2009 konnte erfolgreich ein Nachweis erbracht werden, dass sowohl das Messsystem als auch das Auswerteprogramm für die Kontrolle und sichere Interpretation von dynamischen Bauwerksdeformationen auf Grund natürlicher Anregungsquellen, wie z. B. Wind oder Verkehr, geeignet sind. Diese Tatsache wurde auch bei den Testmessungen an einem unikalen Brückenbauwerk in einem Kooperationsprojekt von Wissenschaftlern aus Deutschland und Armenien er-

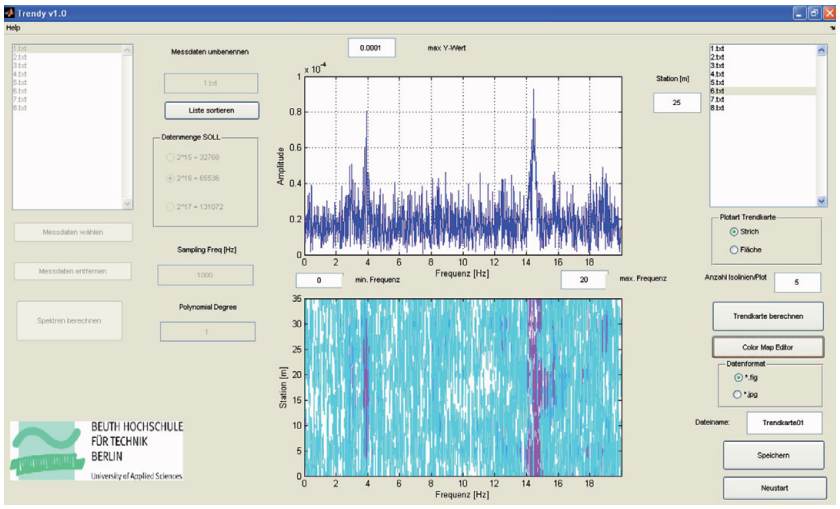

Abb. 4: Auswerteprogramm

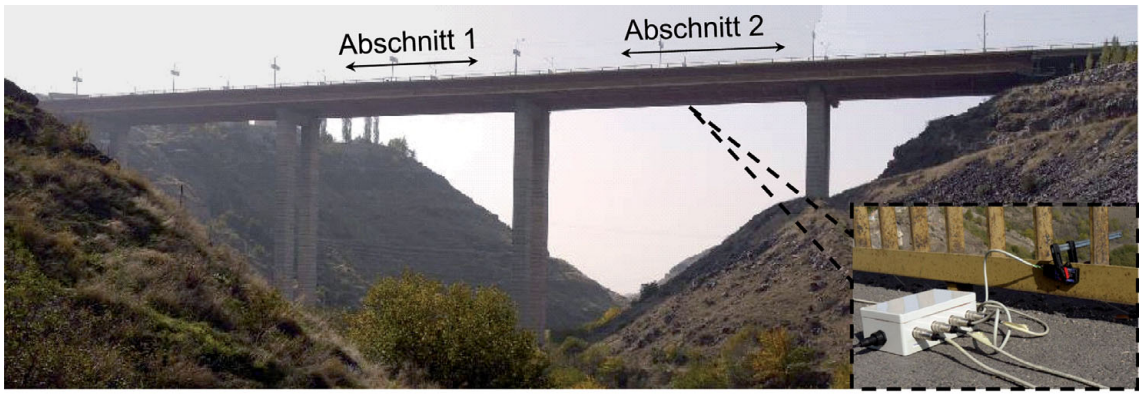

Abb. 5: Davidaschen-Brücke in Erevan, Armenien

folgreich bestätigt. Bei dem untersuchten Bauwerk handelt es sich um die Davidaschen-Brücke, eines der wichtigsten Bauwerke in der Verkehrsstruktur der Hauptstadt der Republik Armenien, Erevan.
Armenien ist ein relativ kleiner Binnenstaat im Kaukasus, der im Bergland zwischen Georgien, Aserbaidschan, dem Iran und der Türkei liegt. Es ist ein sehr ausgeprägtes Gebirgsland mit sehr großen Höhenunterschieden, an die auch die Verkehrsinfrastruktur angepasst werden musste. So weist die betrachtete Brücke über den Fluss Razdan mit einer Gesamtlänge von nur etwa 500 m über den tragenden Betonpfeilern eine Höhe von bis zu 92 m auf (Abb. 5). Die Brücke hat einen sehr leichten Überbau aus Stahl. Der Unterbau besteht aus den beiden Widerlagern und drei tragenden Pfeilern aus Stahlbetonblöcken mit einem Querschnitt von etwa 5 m × 3,8 m. Es war bereits vor dem Herstellen dieses schlanken und sehr eleganten Bauwerkes bekannt, dass es auf Grund natürlicher Anregungsquellen, wie z. B. Wind oder Verkehr, in Schwingungen mit großer Amplitude versetzt werden kann. Durch die messtechnische Erfassung der dynamischen Charakteristik von solchen Schwingungen an den charakteristischen Punkten des Brückenüberbaus wurde nun ein Versuch unternommen, die Überwachung weit über die Möglichkeiten herkömmlicher geodätischer Inspektionsverfahren zu erweitern und gleichzeitig die entwickelte Methodik zu testen.
Da die Beschreibung von allen Mess- und Auswertungsergebnissen den Umfang des Beitrages sprengen würde, sollen hier nur zwei Experimente zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens des Bauwerkes beschrieben werden. Die Lage der beiden kontrollierten Abschnitte auf der

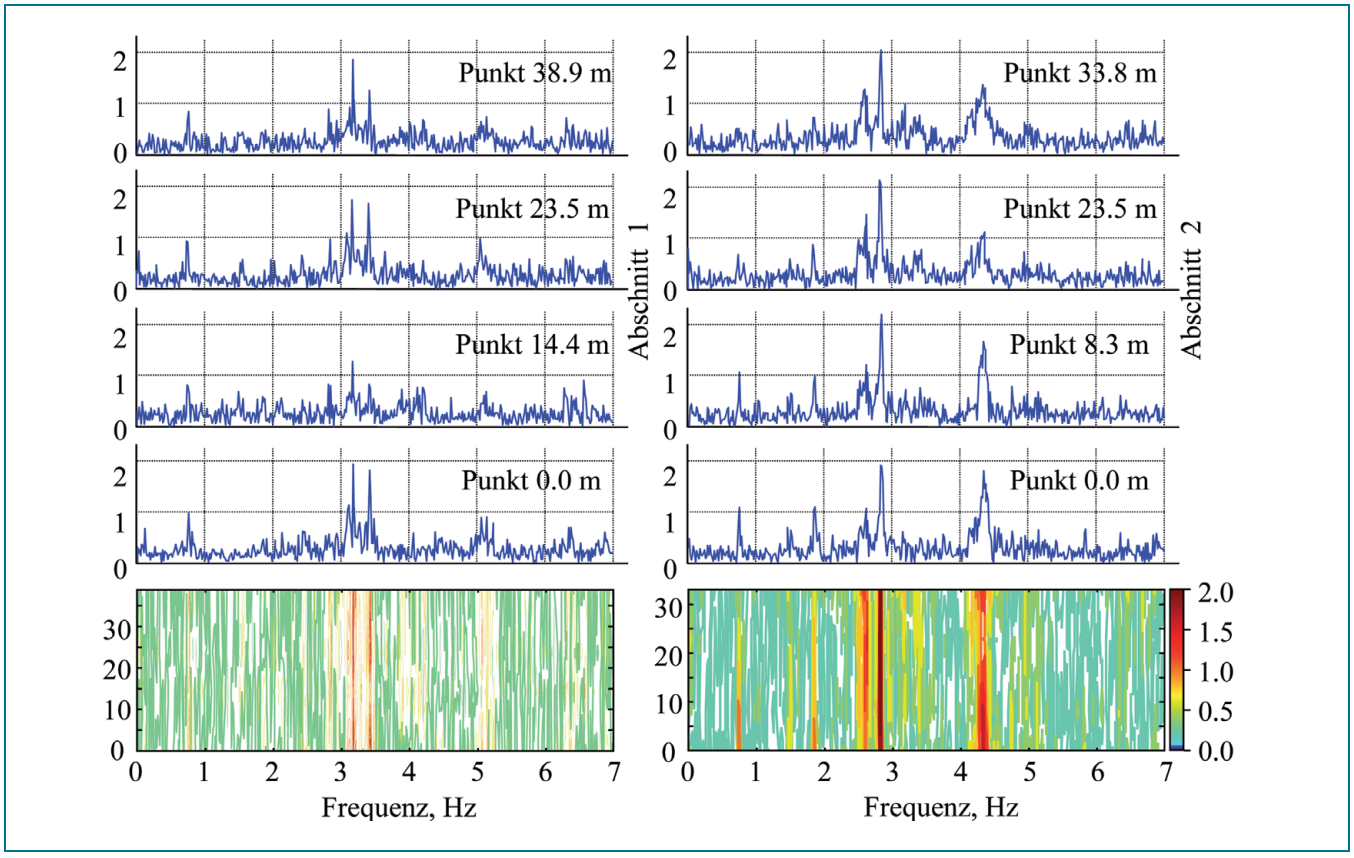

Abb. 6: Ausgewählte Ergebnisse der Auswertung

Brücke mit jeweils vier Sensoren und einer Länge von etwa 40 m wird in der Abb. 5 gezeigt. Die ausgewählten Ergebnisse der Schwingungserfassung in Querrichtung von jeweils einer Messepoche bei einem üblichen Verkehraufkommen sind in der Abb. 6 präsentiert.
Bekanntermaßen werden Bauwerke nur geringfügig zu erzwungenen Schwingungen angeregt, solange sich die Frequenzen von der Eigenfrequenz deutlich unterscheiden. Die Messungen unter Last (Anregung durch Verkehr) zeigen eine eindeutige dynamische Charakteristik des Tragwerkes mit mehreren Eigenfrequenzen als einzelne Frequenzspitzen in den Spektrogrammen bzw. als die entsprechenden vertikalen dunklen Linien in den Trendkarten. Dabei ergeben sich die wesentlichen Unterschiede auf den beiden kontrollierten Abschnitten des Bauwerkes. Die mehrfach wiederholten Messungen an gleichen Punkten ergeben weitgehend ähnliche Ergebnisse. Es ist geplant, auch im Rahmen von zukünftigen jährlichen Inspektionen mit wiederholten Messungen das Schwingungsverhalten an den ausgewählten Punkten zu erfassen und mit den vorliegenden Werten zu vergleichen.

Fazit

Das Schwingungsverhalten eines Bauwerkes kann durch eine dynamische Analyse bestimmt werden. Wird versucht, das Schwingungsverhalten rechnerisch am Computermodell zu erfassen, so sind durch die unbekannten Randbedingungen die Ergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet. Durch die messtechnische Erfassung der dynamischen Charakteristik kann ein an die Realität angepasstes Rechenmodell erstellt werden. Weiterhin ist es möglich, durch dynamische Messungen das Langzeitverhalten und damit den Zustand des Bauwerkes über die Zeit zu beurteilen. Durch Messung und Analyse des realen Schwingungsverhaltens im Rahmen des Monitorings können somit Ergebnisse erzielt werden, die weit über die Möglichkeiten herkömmlicher geometrischer Kontrollmessungen hinausgehen und für seine Aussagekraft von großem Nutzen sind.

Literatur

[1] Neitzel, F., Schwanebeck, Th., Schwarz, W.: Zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren. AVN 6/2007, S. 202-211.
[2] Resnik, B. (2009): Analyse von hochfrequenten geodätischen Deformationsmessungen mit gefensterter Fourier-Transformation. AVN 2/2009. S. 70-74.
[3] Resnik, B. (2007): Approximation von dynamischen Bauwerksdeformationen anhand der kontinuierlichen Messung mit geodätischen Sensoren. VDVmagazin 5/2007. S. 360-363.
[4] Wenzel, H. (2009): Health Monitoring of Bridges. John Wiley & Sons, Ltd. 621 S.

Anschrift des Autors:
Prof. Dr.-Ing. Boris Resnik
Beuth Hochschule für Technik Berlin
Fachbereich Bauingenieur- und Geoinformationswesen
Luxemburger Straße 10
13353 Berlin
E-Mail: resnik@beuth-hochschule.de

ANKÜNDIGUNG

VDI sucht Preisträger für Technikgeschichte

- VDI lobt zum dritten Mal Preis für Technikgeschichte aus
- Conrad-Matschoß-Preis 2011 des VDI mit 3.000 Euro dotiert
- Bewerbungsfrist läuft bis 31. Juli 2010

Der VDI Verein Deutscher Ingenieure lobt zum dritten Mal den Conrad-Matschoß-Preis für Technikgeschichte aus. Er ist mit 3.000 Euro dotiert und soll auf der Technikgeschichtlichen Tagung in Bochum im März 2011 verliehen werden. Mit dem Preis will der größte Ingenieurverein Europas das Interesse für Technikgeschichte stärken, Beiträge zur besseren Verständlichkeit der Technikgeschichte fördern und die technikhistorische Forschung unterstützen. Vorschläge und Eigenbewerbungen sind bis zum 31. Juli 2010 erbeten. Prämiert werden deutschsprachige Beiträge in Print- und elektronischen Medien, die seit 2008 entstanden sind.
Die Jury aus führenden Technikhistorikern legt gleichermaßen Wert auf die fachliche Qualität wie auf die gute allgemeine Verständlichkeit für Fachfremde.

Weitere Informationen und Bewerbung:
Verein Deutscher Ingenieure e. V. –
Bereich Technikgeschichte,
Michael Kussmann,
Postfach 10 11 39,
40002 Düsseldorf,
Tel. 0211/6214 - 205,
Fax 0211/6214 - 148,
E-Mail tub@vdi.de oder unter
www.vdi.de/matschoss-preis.

Conrad Matschoß (1871 - 1942), Ingenieur und einstiger VDI-Direktor, gelang es, die Technikgeschichte als wissenschaftliche Disziplin zu begründen. Der Conrad-Matschoß-Preis des VDI für Technikgeschichte soll im Sinne des Namensgebers die historische Analyse und Darstellung der Technik und der Ingenieure im Rahmen von Gesellschaft, Wissenschaft und Umwelt fördern.