Dynamische Belastungstests von tragenden Konstruktionen mithilfe von Beschleunigungsaufnehmern

Dynamic Load Testing of Bearing Structures with the Help of Accelerometers

Boris Resnik, Artashes Sargsyan

Bei der Fertigstellung eines typischen Brückenbauwerks in Armenien wurden umfangreichen Testmessungen unter Belastung durchgeführt, um die Qualität der Bauarbeiten und Baumaterialien zu verifizieren. Von den Autoren wurde dabei ein Versuch unternommen, durch die Erfassung der dynamischen Charakteristik von Deformationen mit den Beschleunigungsaufnehmern diese Testmessungen über die Möglichkeiten herkömmlicher Mess- und Auswerteverfahren zu erweitern. Unter anderem ist es dabei gelungen, sowohl die üblichen Schwingungsparameter an den charakteristischen Punkten als auch das geometrische Durchbiegen von tragenden Konstruktionen bei der Durchfahrt eines schwer beladenen Fahrzeugs zu ermitteln. Um einen Vergleich von diesen empirischen Parametern mit den theoretischen Werten zu ermöglichen, wurde von den Autoren ein FEM-Modell des Bauwerks geschaffen und eine umfassende Analyse der Ergebnisse durchgeführt.

Schlüsselwörter: Belastungstest, dynamische Beanspruchung, Beschleunigungsaufnehmer, FEM, Dämpfungsverhalten, Durchbiegen

Scientific cooperation of the Beuth HS Berlin, Germany and the Yerevan State University of Architecture and Construction has led to several research projects in the field of structural health monitoring. This article presents all necessary steps of data acquisition, processing and interpretation of dynamic load testing of bearing structures in order to verify the quality of construction and building materials. The realization of dynamic tests and results interpretations on the typical bridge span with a measurement system based on low-cost accelerometers demonstrates the efficiency of the proposed method and proves its accuracy for health monitoring of complex structures. The results are compared with the theoretical data of dynamic characteristics obtained from the numerical model on the base of a finite element method.

Keywords: Dynamic load testing, dynamic characteristics, accelerometer, FEM, damping ratio, deflection

1 EINFÜHRUNG

Präzise geodätische Deformationsmessungen sind spätestens seit den ersten Jahrzehnten des letzten Jahrhunderts im Zusammenhang mit dem Bau von Staumauern und Brücken zu einem Standardverfahren der Bauwerksüberwachung geworden. Basierend auf den damals hoch entwickelten optischen bzw. mechanischen Messverfahren erlaubten sie objektive Nachweise des Zustands eines Bauwerks über bestimmte Zeitintervalle oder auch bei speziellen Belastungstests, auch wenn es sich dabei nur um eine begrenzte Anzahl rein geometrischer Parameter handelte. Bei anderen vorhandenen Verfahren der Überwachung dominierten dagegen sehr lange Zeit handwerkliche Methoden auf der Basis visueller Beurteilungen. Zwar wurden dafür auch unterschiedliche Hilfsmittel eingesetzt, dennoch waren die Ergebnisse meist vom subjektiven Erkennen von Schäden durch das die Prüfung durchführende Personal abhängig. In den letzten Jahrzehnten wurden allerdings außerhalb des Vermessungswesens sehr viele alternative Messverfahren mit elektrischen Extensometern, Dehnungsmessstreifen, faseroptischen Sensoren, um hier nur einige Beispiele zu nennen, entwickelt, die in jedem Fall im Nahbereich die üblichen geodätischen Punktmessungen ersetzen können und einen wesentlich höheren Automatisierungsgrad aufweisen /Schwarz 2009/. Durch die rasante Entwicklung der Mikroelektronik können inzwischen auch die "klassischen" geodätischen Instrumente, wie motorisierte Tachymeter, GNSS-Empfänger, Digitalnivelliere oder Neigungssensoren im Routinebetrieb oftmals ohne einen Bediener mit einem speziellen geodätischen fachlichen Hintergrund auskommen. Somit ist es in den letzten Jahrzehnten zu einer weitgehenden Verschmelzung von unterschiedlichen Verfahren bei den Deformationsmessungen gekommen, wobei oftmals nicht mehr Vermessungsingenieure, sondern andere Fachrichtungen einen entscheidenden Teil der Aufgaben bewältigen. Vor diesem Hintergrund führt kein Weg daran vorbei, dass sich auch die Ingenieurvermessung wesentlich intensiver mit der speziellen geo- und bautechnischen Sensorik in der Ausbildung, Forschung und praktischen Anwendung beschäftigt.

Ein typisches Beispiel dieser Art liefert die Schwingungserfassung. Bekanntermaßen sollte die Abtastrate von Messsensoren bei der Erfassung von dynamischen Prozessen so gewählt werden, dass sie doppelt so groß ist wie die höchste zu untersuchende Frequenz. Bei der Beschränkung auf die geodätischen Messverfahren mit maximalen Abtastfrequenzen bis etwa 10 - 20 Hz wird theoretisch 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 jedoch die Trennbarkeit zwischen den tatsächlich stattgefundenen 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-Empfänger in diesem hochfrequenten Bereich zeigen, dass die so gewonnenen Ergebnisse oftmals durch starke systematische Einflüsse der Atmosphäre etc. verfälscht werden, sodass der zuverlässige Arbeitsbereich auf maximal 3 – 5 Hz zu begrenzen ist. Um ein zutreffendes Bild über das aktuelle Tragsystem zu erhalten, ist es oftmals erforderlich, auch wesentlich höhere Frequenzen zu betrachten. Solche dynamischen Bauwerksverformungen können am besten mit Beschleunigungsaufnehmern unterschiedlicher Art erfasst werden, die bereits seit mehreren Jahrzehnten im Bauwesen im Einsatz sind.

Durch Messung und Analyse des realen Schwingungsverhaltens im Rahmen des Monitorings können Ergebnisse erzielt werden, die weit über die Möglichkeiten herkömmlicher geometrischer Kontrollmessungen hinausgehen und für ihre Aussagekraft von großem Nutzen sind. In erster Linie handelt es sich dabei um die messtechnische Erfassung der dynamischen Charakteristiken wie Eigenfrequenzen etc. und der Änderungen dieser Parameter im Laufe der Zeit /Resnik 2010, 2011/. Diese Vorgehensweise wird im Beitrag anhand eines typischen Beispiels näher behandelt. Bei der Anwendung von Beschleunigungssensoren in Kombination mit klassischen geodätischen Verfahren liegt ein weiterer Innovationsaspekt in der Entwicklung eines stabilen Auswertealgorithmus zur Berechnung von präzisen geometrischen Deformationen aus den gemessenen Beschleunigungszeitreihen. Obwohl dieses Verfahren aufgrund starker systematischer Einflüsse nie die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von klassischen geodätischen Verfahren erreichen wird, kann sich durch Einsatz von weiteren Sensoren z. B. eine unabhängige und effiziente Kontrolle der gewonnenen Messwerte ergeben. Die ersten umfangreichen praktischen und theoretischen Untersuchungen dieser Art im Bereich des Vermessungswesens wurden in den letzten Jahren an der Universität Weimar /Schwarz 2006/ durchgeführt. Diese Pionierleistungen sind nach der Veröffentlichung auf großes Interesse in den Fachkreisen gestoßen und wurden unmittelbar danach weiterentwickelt /Neitzel et al. 2007/. Zu solchen "Nachmachern" gehören auch die Verfasser dieses Beitrags.

2 REALISIERUNG DES DYNAMISCHEN BELASTUNGSTESTS

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. Mit dem Ausbau der modernen Infrastruktur in Armenien wurden in den letzten Jahren deswegen viele große verkehrstechnische Bauwerke erstellt. Einige von ihnen wurden auch von den Autoren im Rahmen von Forschungsproiekten umfangreich untersucht /Resnik & Sargsyan 2013/. Für die Entwicklung und das Testen der Methodik der baudynamischen Untersuchungen sind allerdings die kleinen Bauwerke von großem Vorteil, da dabei eine ausreichende Anzahl von Messpunkten und eine sichere Interpretation von Ergebnissen wesentlich leichter zu ermöglichen sind. So weist die in diesem Beitrag behandelte Brücke über den Fluss Pambak in Armenien eine Stützweite von nur etwa 17,4 m und die Breite im Querschnitt von 4,5 m auf. Die tragenden Konstruktionen beinhalten im Querschnitt zwei T-Balken aus Stahlbeton. Widerlager der Brücke bestehen aus den massiven Betonfundamenten. Das Bauwerk wurde im Frühling 2012 fertiggestellt. Die in Armenien gesetzlich vorgeschriebenen Abnahmetests von Bauwerken dieser Art wurden dabei unter Teilnahme der Verfasser realisiert. Für die Bestimmung der dynamischen Deformationsparameter der tragenden Konstruktionen wurde u. a. ein schwer beladenes Fahrzeug mit einem Gesamtgewicht von etwa 19 Tonnen mit einer konstanten Geschwindigkeit von 25 km/h über die Brücke gefahren (Abb. 1). In diesem Beitrag werden exemplarisch nur die vertikalen Komponenten der Deformationen unter dieser Belastung näher behandelt.

Um die Reaktion der tragenden Konstruktionen auf eine dynamische Belastung zuverlässig untersuchen zu können, bedarf es umfangreicher geometrischer und physikalischer Informationen. Diese Informationen müssen im Unterschied zu den statischen Belastungen mit einer ausreichend hohen Abtastfrequenz erfasst werden. Außerdem sollten zur Kontrolle der Ergebnisse mindestens zwei unabhängige Verfahren zum Einsatz kommen. Aus diesen Gründen wurde beim beschriebenen Test unter anderem ein mechanischer Wegaufnehmer für die Bestimmung des Durchbiegens etwa in der Mitte der Brücke installiert. Mit diesem einfachen Messsystem wurden die relativen Streckenänderungen zum Bodenpunkt von der



Abb. 1 | Prinzip des dynamischen Belastungstests

Unterkante der tragenden Balken mit einer Genauigkeit besser als 0,1 mm erfasst. Ergänzend dazu wurde ein Schwingungssensor eigener Konstruktion /Resnik & Gerstenberg 2011/ eingesetzt. Als Ergebnis der Datenerfassung mit dem verwendeten Schwingungssensor wurde im Laufe des Belastungstests eine zeitlich geordnete Folge von Messwerten (Beschleunigungen) erzielt. In Bezug auf das Hauptziel der Untersuchung mussten bei der folgenden Analyse der gewonnenen Daten festgestellt werden, ob die dynamischen Schwingungsparameter (Eigenfrequenzen und -formen, Dämpfungskoeffizienten etc.) sowie das ermittelte Durchbiegen von tragenden Konstruktionen bei der dynamischen Belastung in einem nachvollziehbaren Verhältnis zu den zu erwarteten (theoretischen) Werten stehen.

3 ANALYSE DES SCHWINGUNGSVERHALTENS VON TRAGENDEN KONSTRUKTIONEN

Da die Beschreibung mehrerer Mess- und Auswertungsergebnisse den Umfang dieses Beitrags sprengen würde, soll hier nur ein Test exemplarisch behandelt werden. Die ausgewählte Zeitreihe von etwa 10 Sekunden beginnt vor der Einfahrt des Fahrzeugs und endet nach dem Ausklingen der entstandenen Schwingungen (Abb. 2, oben). Die Untersuchung des Datenmaterials auf vorhandene Periodizitäten wurde wie üblich durch die Fast-Fourier-Transformation (FFT) ermöglicht /Heunecke et al. 2013/. In diesem Spektrogramm bildet das Messrauschen ein Niveau von etwa 10⁻⁵ g und charakterisiert die reale Empfindlichkeit des Messsystems. Die Grafik zeigt außerdem eine eindeutige dynamische Charakteristik des Tragwerks mit mehreren einzelnen Spitzen oberhalb des oben genannten Rauschpegels. Im nächsten Schritt wurde die Zeitreihe ab der etwa fünften Sekunde des Tests (Ende der Durchfahrt) abgeschnitten. Der Bewegungsablauf ist dabei allen durch die Systemparameter der Konstruktionen bestimmt und die ausklingenden Schwingungen als weitgehend frei zu betrachten (Abb. 2, unten). Dabei ergibt sich ein wesentlich einfaches Bild mit der Eigenfrequenz von 4,94 Hz.

Der ingenieurmäßige Grundgedanke der Methode der finiten Elemente (FEM) ist das Zerlegen eines Körpers in ein Netz kleiner Bereiche, innerhalb derer die Unbekannten der Problemstellung in einfacher Parameterdarstellung beschrieben werden können

Entspannen Sie sich. Ab jetzt wird vieles schneller.



Entspannen Sie sich und schöpfen Sie gleichzeitig das Potential Ihrer Instrumente besser aus. Die neuen Leica Qualitätsdienste ermöglichen es Ihnen. Leica erweitert die Dienstleistungen rund um die Instrumente. Ob **Datensicherung** oder **Echtzeithilfe direkt im Feld** oder dem **eigenen Referenzdienst:**

Unser Anspruch: Den besten Service für die besten Instrumente.

Die neuen Leica Dienste



/Heunecke et al. 2013/. In einem anschließenden Rechengang werden die Einzelergebnisse fachwerkartig zum Gesamtergebnis zusammengeführt. Die FEM erlaubt es somit, auch die komplexen Bauwerke mithilfe von speziellen Computerprogrammen in einfache Bestandsteile zu zerlegen und das Gesamtmodell den dynamischen Analysen zu unterziehen. Um einen Vergleich von theoretischen und empirischen Schwingungsparametern zu ermöglichen, wurde von den Autoren anhand der vorliegenden Baupläne und eigenen Vermessungen mit einem speziellen multifunktionalen Programmsvstem SAP2000 ein solches detailliertes dreidimensionales Modell des Bauwerks geschaffen. Im Laufe der folgenden dynamischen Analysen wurden die möglichen dynamischen Belastungen unterschiedlicher Art berücksichtigt. Im präsentierten Beispiel wurde z. B. ein vertikaler Impuls modelliert, der einem Sprung einer Lkw-Achse von einer etwa 15 cm hohen Stufe entspricht. Als Ergebnis der Auswertung wurden mehrere Eigenfrequenzen (Abb. 3, rechts) mit einem maximalen Wert bei f = 4,74 Hz festgestellt.

Die theoretischen Berechnungen und Prognosen mit den FEM-Simulationen sind leider meistens mit großen Unsicherheiten behaftet. Es ist z. B. bekannt, dass gerade bei den Massivbrücken die Wirkungsweise von Brückenauflagern, Mitwirkung sekundärer Bauelemente sowie die Annahme von Dämpfungsgrößen besonders schwer mit genügend Genauigkeit abzuschätzen ist /Petersen 2000/.



Spektrogramm (freie Schwingungen)

Abb. 2 | Analyse des Schwingungsverhaltens



Abb. 3 | Ergebnisse der FEM-Simulation

Durch diese unbekannten Randbedingungen werden auch die ermittelten modalen Parameter meistens erheblich verfälscht. Da es sich beim behandelten Beispiel jedoch um ein relativ einfaches Bauwerk handelt, stimmen die so gewonnenen Ergebnisse mit den oben genannten empirischen Werten sehr gut überein.

4 ANALYSE DES DÄMPFUNGSVERHALTENS VON TRAGENDEN KONSTRUKTIONEN

Alle realen Tragwerke haben eine Dämpfung, die z.B. bei einer einmaligen Anregung ein kontinuierliches Ausklingen der entstandenen Schwingungen bewirkt, bis schließlich die "statische Ruhelage" erreicht wird. Die Dämpfungseigenschaften sind frequenzabhängig und stellen eine für die Systemidentifikation maßgebende Größe dar. Diese Parameter wurden deswegen anhand des beschriebenen Ausschwingungsversuchs nach unterschiedlichen Verfahren ermittelt und mit den theoretischen Werten verglichen.

Ein übliches Maß für die Beschreibung des Dämpfungsverhaltens in frei schwingenden Schwingungssystemen ist das logarithmische Dekrement λ . Es errechnet sich aus dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses von Amplituden zweier ermittelten Ausschläge gleicher Richtung A_0 und A_N mit einer bekannten

> Anzahl von vollen Wellen N zwischen beiden /Petersen 2000, S. 287/, Für die Ermittlung von Dämpfungsparametern nach diesem Prinzip wurden im behandelten Beispiel die Messungen etwa zwischen der 6. und 8. Sekunde (freie Schwingungen in der Abb. 2) mit einer vollen Anzahl von Wellen (N = 5) ausgewählt:

$$\lambda = \frac{1}{N} \ln \frac{A_0}{A_N} = 0,215.$$
 (1)

Auf der Basis dieser Berechnung kann ebenfalls ein Dämpfungsgrad (sog. Lehrsches Dämpfungsmaß) D ermittelt werden /Petersen 2000, S. 127/

$$D = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(2\pi\right)^2 + \lambda^2}} = 0,034 \qquad (2)$$

das im Bauwesen ebenfalls oftmals bei den baudynamischen Berechnunaen verwendet wird.

Obwohl eine empirische Erfassung des Dämpfungsverhaltens in frei schwingenden Schwingungssystemen nach der Formel (1) auch heute der üblichen Vorgehensweise im Bauwesen entspricht, ist sie erheblich durch die technischen Möglichkeiten des letzten Jahrhunderts geprägt. Hauptproblem beim Anwenden dieses Verfahrens ist eine subjektive Auswahl von bestimmten Wellen nach dem

Ausschwingungsversuch mit der Vernachlässigung der anderen. Wesentlich aussagekräftiger ist eine Berechnung im ganzen Intervall des Ausklingens nach der Methode der kleinsten Quadrate. Ein exponentielles Abnehmen der Amplitude eines Schwingvorgangs kann bekanntermaßen durch die Gleichung

$$y_t = y_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \sin(\omega_d \cdot t + \varphi_0) \tag{3}$$

beschrieben werden, wobei y_t die aktuelle Position zum Zeitpunkt t, y_0 die Anfangsauslenkung mit der Phasenverschiebung φ_0 sowie ω_d die entsprechende Eigenkreisfrequenz unter Berücksichtigung der Dämpfung sind. Die sog. Abklingkonstante $\delta = \omega_0 D$ ist ein Produkt aus der Eigenkreisfrequenz ω_0 und dem oben genannten Dämpfungsgrad D. Jede vorhandene Neubestimmung der Auslenkung y_t liefert eine zusätzliche Gleichung eines nicht linearen Gleichungssystems mit vier Unbekannten y_0, φ_0, ω_d und δ . Nach der üblichen Linearisierung des Gleichungssystems können die Näherungswerte dieser Parameter bei den mehrfach wiederholten Berechnungen so verbessert werden, dass ihre Änderungen wesentlich kleiner als die Messgenauigkeit ausfällt. Die Ergebnisse einer solchen Berechnung für das behandelte Beispiel sind in Abb. 4 dargestellt. Die ausgeglichene Abklingkonstante für das ganze Intervall zwischen der 6. und 8. Sekunde des Versuchs ($N \approx 10$) beträgt $\delta = 1,1157$ und der entsprechende Dämpfungsgrad $D = \delta / \omega_0 = 0,037$. Dieser Wert entspricht den früheren Ergebnissen recht gut und weist eine wesentlich bessere Zuverlässigkeit auf.

Der Dämpfungsgrad (*D*) lässt sich ebenfalls aus der dynamischen Reaktion an der Resonanzstelle (f_A) mithilfe von üblichen Amplitudenspektren ermitteln /Petersen 2000, S. 297/. Es kann bewiesen werden, dass der Wert *D* aus der Breite der Resonanzkurve (Δf_A) in der Höhe des Amplitudenwertes $A_{max} / \sqrt{2}$ bestimmt werden kann (man spricht dabei von der Halbwertsbreite):

$$D = \frac{f_A}{2 \cdot \Delta f_A} \,. \tag{4}$$

Im behandelten Beispiel (*Abb. 4*) beträgt der Dämpfungsgrad folglich einen Wert von $D = 0.525/(2 \times 4.937) = 0.053$. Diese Lösung ist wegen einer geringen Genauigkeit allerdings nur für eine grobe Abschätzung geeignet.

Um die erhaltenen Dämpfungsparameter zu verifizieren, wurden alternative Berechnungen nach den Formeln der Baumechanik /Petersen 2000/ durchgeführt. Die gute Übereinstimmung von theoretischen und empirischen Werten bestätigte eine hohe Qualität der Bauarbeiten und das Einhalten der vorgeschriebenen Materialparameter.

5 BERECHNUNG DES DURCHBIEGENS VON TRAGENDEN KONSTRUKTIONEN

Zur Berechnung von präzisen geometrischen Deformationen aus den Beschleunigungswerten müssen stabile und zuverlässige Auswertealgorithmen entwickelt werden. Um von den aufgezeichneten Beschleunigungswerten a_i zu den entsprechenden geometrischen Verschiebungen y_i zu gelangen, müssen die Messwerte zunächst zweimal über die Zeit integriert werden. Grundsätzlich stehen dabei eine Vielzahl von numerischen Integrationsverfahren zur Verfügung (z. B. Rechteckverfahren, Trapezverfahren, Simpson-Formel, Romberg-Methode etc.). Besonders effizient wäre jedoch eine rekursive Formel, die ein zweifaches Integrieren in einem Schritt ermöglicht.

Entspannen Sie sich. Ab jetzt wird vieles sicherer.



Entspannen Sie sich und schöpfen Sie gleichzeitig das Potential Ihrer Instrumente besser aus. Die neuen Leica Qualitätsdienste ermöglichen es Ihnen. Leica erweitert die Dienstleistungen rund um die Instrumente. Ob **Datensicherung** oder **Echtzeithilfe direkt im Feld** oder dem **eigenen Referenzdienst:**

Unser Anspruch: Den besten Service für die besten Instrumente.

Die neuen Leica Dienste





Abb. 4 | Analyse des Dämpfungsverhaltens nach alternativen Verfahren



Abb. 5 | Berücksichtigung von unbekannten Anfangsparametern

So können z. B. nach der Trapezregel die aktuellen Verschiebungen y_{i+1} aus den vorangegangenen Positionen y_{i-1} und y_i , den aktuellen Beschleunigungswerten a_{i+1} und a_{i-1} sowie dem bekannten Zeitintervall Δt zwischen Messungen

$$y_{i+1} = \Delta t^2 \left(a_{i-1} + a_{i+1} \right) / 2 - y_{i-1} + 2y_i \tag{5}$$

berechnet werden. Unter Berücksichtigung der Bedingung $(a_{i-1} + a_{i+1}) / 2 \approx a_i$ können die Positionen auch nach dem Rechteckverfahren /Schwarz 2006/

$$y_{i+1} = \Delta t^2 a_i - y_{i-1} + 2y_i \tag{6}$$

mit einer etwas geringeren Genauigkeit ermittelt werden. Eine Verbesserung des Algorithmus kann auch erzielt werden, wenn die Enden der Intervalle nicht durch eine Gerade (Trapez- bzw. Rechteckverfahren), sondern durch einen Parabelbogen verbunden werden (Simpson-Formel). Die Berechnung erfolgt dabei immer über eine doppelte Teilfläche k = (i + 1) / 2 für die entsprechenden Stützpunkte i = 2k - 1

$$y_{k+1} = (\Delta t/3)^2 (a_{i-3} + 8 a_{i-2} + 18 a_{i-1} + 8 a_i + a_{i+1}) - y_{k-1} + 2 y_k$$
(7)

Die Gesamtanzahl der Messungen muss beim Anwenden dieses Verfahrens eine gerade Zahl sein. Da außerdem dabei immer vier aufeinanderfolgende Intervalle bzw. fünf Stützpunkte verwendet werden, muss das doppelte Integral für die ersten zwei Abschnitte nach der *Trapezformel (5)* ermittelt werden. Bei den hohen Abtastraten, wie im behandelten Beispiel, liefern alle drei Lösungen etwa gleiche Ergebnisse.

Da die erforderlichen Startwerte für Position und Geschwindigkeit des Sensors beim Integrieren prinzipiell unbekannt sind, müssen sie

zunächst willkürlich z. B. mit Nullwerten belegt werden (d. h. $y_1 = 0$ und $v_2 = \Delta t^2 a_1$). Durch diese Annahme entsteht beim doppelten numerischen Integrieren eine typische, fiktive Bewegung in Form einer quadratischen Parabel. In besonderen Fällen, wie z. B. bei der Annahme einer gedämpften harmonischen Schwingung um einen weitgehend konstanten Mittelwert, kann angenommen werden, dass die geometrische Position am Anfang der Schwingung und zu einem späteren zufälligen Zeitpunkt N nach einer relativ großen Anzahl von vollen Wellen weitgehend den gleichen Betrag aufweist (d. h. $y_0 \approx y_N$). Unter Berücksichtigung dieser Annahme kann der fiktive Anteil der ermittelten Bewegung nach der zweifachen Integration mit einem allgemeinen Polynom zweites Grades weitgehend beseitigt werden (Abb. 5, links). Diese Vorgehensweise kann auch auf die üblichen einmaligen Durchbiegungen von tragenden Konstruktionen unter Belastung erweitert werden. Als Ergebnis entstehen dabei elastische (reversible) oder plastische (irreversible) Deformationen. Da im ersten Fall die Positionen am Anfang des Vorgangs und an seinem Ende etwa gleich bleiben ($y_0 \approx y_N$), ist eine indirekte Berücksichtigung von unbekannten Anfangsparametern beim numerischen Integrieren nach dem oben beschriebenen Prinzip ebenfalls möglich (Abb. 5, rechts).

Die Ergebnisse des doppelten numerischen Integrierens von Beschleunigungswerten in der ganzen Länge der behandelten Messreihe von etwa 10 Sekunden (vgl. *Abb. 2*) sind in *Abb. 6* dargestellt. Wegen der im Allgemeinen unrunden Anzahl von vollen Schwingungen zwischen Anfangs- und Endpunkt der Zeitreihe sowie einem eventuell vorhandenen Trend in den Messwerten werden allein durch Abspalten eines Polynoms meistens keine zufriedenstellenden Ergebnisse erhalten. Es sind in der Abbildung beispielsweise deutlich weitere systematische Verfälschungen zu erkennen, die den oben begründeten Gesetzmäßigkeiten von elastischen Deformationen ($y_0 \approx y_W$) widersprechen. Um diese Restfehler des numerischen Integrierens zu beseitigen, wurde von den Autoren ein spezieller Algorithmus des "stützenden Polynoms" entwickelt und in die verwendete Software integriert. Da im behandelten Beispiel die Schwingungen mit einem elastischen Durchbiegen im Laufe des Tests überlagert werden, werden die ermittelten Deformationen außerdem mit einem passenden mathematischen Filter bearbeitet. Für solche Anwendungen werden häufig gleitende Mittelwerte mit gerader und konstanter Gewichtsfunktion verwendet. Die Annahme der Filterlänge ist dann besonders effizient, wenn ein Näherungswert für die Schwingungsfrequenz, wie im behandelten Beispiel, bekannt ist.

Die Endergebnisse der präsentierten Auswertung entsprechen den mit einem mechanischen Wegaufnehmer ermittelten maximalen Deformationen von etwa 4,9 mm. Eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten Werte mit den Berechnungen nach den Formeln der Baumechanik /Petersen 2000/ bestätigte ebenfalls eine hohe Qualität der Bauarbeiten und das Einhalten der vorgeschriebenen Materialparameter.

6 SCHLUSSBETRACHTUNG

Dank neuer Materialien und Technologien konnte im Bauwesen in den letzten Jahrzehnten ein enormer Fortschritt erzielt werden. Die Strukturen moderner Ingenieurbauwerke werden deswegen immer filigraner und graziler, während ihre statischen und dynamischen Belastungen kontinuierlich zunehmen. Die Sicherheit für diese Objekte kann nur durch eine effektive Qualitätskontrolle gewährleistet werden. Die im Beitrag behandelten dynamischen Tests der tragenden Konstruktionen sind eine mögliche Variante einer solchen Kontrolle. Als Ergebnis eines solchen Tests erhält man allgemein die experimentell bestimmten Parameter wie Eigenfrequenzen, Dämpfungskoeffizienten und Durchbiegungen, die folglich mit den theoretischen Werten verglichen werden. Auf Basis dieser Werte muss allgemein eine Vorstellung über den aktuellen Zustand des Überwachungsobjekts im Sinne der Kategorien "gut" und "sicherheitskritisch" erhalten werden.

Während die messtechnische Realisierung solcher Tests durch eine rasante Entwicklung der Mikroelektronik und Computertechnik in den letzten Jahrzehnten immer einfacher wurde, sind viele Fragen der folgenden Datenanalyse noch nicht gelöst und erst als Gegenstand der angewandten Forschung zu betrachten. Dabei sind besonders die mathematischen Methoden wie Approximations- und Spektralanalyse sowie Filtern und numerisches Integrieren der Zeitreihen von besonderer praktischer Bedeutung. Es ist deswegen von den Autoren geplant, diese Methoden in den kommenden Jahren weiter zu untersuchen und zu verfeinern. Dabei werden verschiedene numerische Verfahren sowohl für synthetische als auch für reale Messdaten vergleichend betrachtet, um eine optimale Lösung für die unterschiedlichen Szenarien der Belastungstests bei den weiteren Projekten anbieten zu können.

Entspannen Sie sich. Ab jetzt wird vieles einfacher.



Entspannen Sie sich und schöpfen Sie gleichzeitig das Potential Ihrer Instrumente besser aus. Die neuen Leica Qualitätsdienste ermöglichen es Ihnen. Leica erweitert die Dienstleistungen rund um die Instrumente. Ob **Datensicherung** oder **Echtzeithilfe direkt im Feld** oder dem **eigenen Referenzdienst:**

Unser Anspruch: Den besten Service für die besten Instrumente.

Die neuen Leica Dienste





Abb. 6 | Berechnung des Durchbiegens

LITERATUR

Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach. 688 S.

Neitzel, F.; Schwanebeck, T.; Schwarz, W. (2007): Zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)6, 202–211.

Petersen, C. (2000): Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg Verlag, Braunschweig. 1272 S.

Resnik, B. (2010): Realisierung und Analyse von Schwingungsmessungen in Rahmen des Monitorings am Beispiel eines Brückenwerkes in Armenien. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 117(2010)2, 227–232.

Resnik, B. (2011): Structural Heallth Monitoring und Paradigmenwechsel bei den geodätischen Überwachungsmessungen. In: Forum – Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure e. V., 37(2011)4, 197–206.

Resnik, B.; Gerstenberg, J. (2011): Entwicklung eines Messsystems für Schwingungsmessungen im Rahmen des geodätischen Monitorings. In: Grimm-Pitzinger, A; Weinold, T. (Hrsg.): 16. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2011. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 221–226.

Resnik, B.; Sargsyan, A. (2013): Dynamic Monitoring of Bridges Spans. In: Resnik, B. (Ed.): Opportunities of Geodetic Monitoring on the Example of Current Projects in Eastern Europe. Shaker Verlag, Aachen, 20–27.

Schwarz, W. (2006): Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Brückenbauwerken mittels Laserinterferometer. In: VDI-Berichte, 1941 (Baudynamik), Tagung Kassel, 17./18. Mai 2006. VDI Verlag, Düsseldorf.

Schwarz, W. (2009): Trends in der geodätischen Messtechnik und in ihren Anwendungsfeldern. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)3, 115–127.

Prof. Dr.-Ing. Boris Resnik

BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN FACHBEREICH BAUINGENIEUR- UND GEOINFORMATIONSWESEN

Luxemburger Straße 10 | 13353 Berlin resnik@beuth-hochschule.de

Dr. Artashes Sargsyan

YEREVAN STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION



105, Teryan Street I Yerevan, 0009 Armenia ansargsyan@yahoo.com

Manuskript eingereicht: 20.11.2013 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet