Dauermessungen für neue Bauweisen im Brückenbau

Ronald Stein¹, Jochen Rodemann², Karsten Geißler³,

Zusammenfassung: Bei der Einführung neuer Bauweisen und Bauverfahren im konstruktiven Ingenieurbau können Dauermessungen einen sinnvollen Beitrag für den Eignungsnachweis leisten. Am Beispiel des Brückentyps "Netzwerkbogen", der seit einigen Jahren für Straßen- und für Eisenbahnbrücken häufiger zur Ausführung kommt, wird gezeigt, wie mit Hilfe von Bauwerksmessungen, insbesondere Dauermessungen das Verhalten dieser Konstruktionen unter Beanspruchungen aus Verkehr und Wind analysiert und bewertet werden kann.

Abstract: Long-term measurements can contribute to the verification of suitability when new building technologies and construction methods are implemented. The authors demonstrate by the example of the network arch, which for some years now has been frequently used for road- and railway bridges, how the behaviour of the structure under traffic and wind loads can be analysed and evaluated with the help of long-term measurements and monitoring.

¹ Dipl.-Ing. Ronald Stein, GMG Ingenieurgesellschaft mbH, George-Bähr-Straße 10, 01069 Dresden

² Dipl.-Ing. Jochen Rodemann, GMG Ingenieurgesellschaft mbH, George-Bähr-Straße 10, 01069 Dresden

³ Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, TU Berlin, FG Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Einleitung

Wenn in der Automobilindustrie ein neues Fahrzeugmodell in Serie geht, hat es über mehrere Monate hinweg eine Vielzahl von Tests durchlaufen. Alle wichtigen Bauteile und Funktionen des Fahrzeuges, insbesondere die neu entwickelten Komponenten, werden mit einer aufwendigen Sensorik unter harten Einsatzbedingungen überwacht, die Daten ausgewertet und die Konstruktion gegebenenfalls verbessert. Die moderne Messtechnik, die Auswertung der Messdaten am PC - immer in Verbindung mit Simulationsrechnungen - und die kabellose Datenfernübertragung sind für den Entwicklungsingenieur heute ideale und unverzichtbare Arbeitsmittel.

Auch im Bauwesen ist die Einführung neuer Bauweisen oder Konstruktionsformen ein wichtiges Einsatzgebiet für Bauwerksmessungen, insbesondere von Dauermessungen. Da es bei Ingenieurbauwerken im Allgemeinen keine Prototypen gibt und man dem Bauwerk die Beanspruchungen nicht ansieht, ist es umso sinnvoller, die Tragwerke nach der Verkehrsfreigabe für einen gewissen Zeitraum messtechnisch zu begleiten. Durch dynamische Messungen der Verformungsgrößen am Bauwerk kann überprüft werden, ob sich das Tragwerk unter realen Beanspruchungen so verhält, wie es in den statischen und dynamischem Berechnungen ermittelt wurde.

Die Anforderungen an neue Bauweisen können anhand der mit der Messung gewonnenen Erkenntnisse präzisiert und die Konstruktionen optimiert werden. Die Akzeptanz von Neuerungen und das Vertrauen in neue Konstruktionsformen beim Bauherren wird auf diese Weise befördert. In der aktuellen Fassung des Moduls 805.0104 wurden Langzeitmessungen für bestehende Bauwerke erstmals als Stand der Technik normativ festgeschrieben [1].

In den vergangenen Jahren wurden in Deutschland einige Straßen- und Eisenbahnbrücken im Stützweitenbereich um 100 m als Netzwerkbögen realisiert. Die Hänger zwischen Bogen und Versteifungsträger sind bei dieser Bauform schräg – als Netz – angeordnet [2].

Durch das statisch optimierte Tragwerk kann gegenüber einer Stabbogenbrücke im Allgemeinen eine erhebliche Reduzierung des Stahleinsatzes erreicht werden – bei wesentlich höherer vertikaler Steifigkeit.

Die Bauform Netzwerkbogenbrücke ist dabei nicht neu. Bereits 1963 wurde die Fehmarnsundbrücke [3], [4] in Betrieb genommen (Bild 1). Mit einer Stützweite von 250 m ist sie bis heute eine der größten Netzwerkbogenbrücken weltweit. Die Leichtigkeit und Eleganz der Bauweise sind bestechend.

Während bei der Fehmarnsundbrücke die Hänger wie bei einer Hänge- oder Schrägkabelbrücke aus vollverschlossenen Spiralseilen bestehen, werden bei den neuen, kleineren Netzwerkbögen Flachstahlhänger eingesetzt.

Neben den bereits genannten Vorteilen gegenüber einer Stabbogenbrücke – geringer Stahleinsatz und hohe vertikale Steifigkeit – bestehen auch einige Nachteile. Die Montage der sehr weichen Hängerstäbe stellt hohe Anforderungen an den Fertigungsbetrieb. Bei einseitigen Laststellungen kann es in Überlagerung mit Temperaturgradienten zum schlaff werden von Hängern kommen. Da die schrägen Hänger geringe Abmessungen haben, sind sie eher anfällig gegenüber wirbelerregten Querschwingungen. Die Kreuzungen der Hänger bieten jedoch die elegante Möglichkeit, Kopplungen vorzusehen und somit Schwingungsprobleme weitgehend auszuschließen [5].





Vom Eisenbahnbundesamt wurde für die neu errichteten Netzwerkbogenbrücken die Durchführung von messtechnisch begleiteten Probebelastungen gefordert.

In den folgenden zwei Abschnitten wird von Bauwerksmessungen im Rahmen einer solchen Probebelastung und von Messungen zur Ermittlung der Normalkräfte und der Schwingungsanfälligkeit von Flachstahlhängern berichtet.

Im dritten Abschnitt wird von einer Dauermessung berichtet, die durchgeführt wurde, um die seitliche Schwingungsanfälligkeit einer weit gespannten eingleisigen Brücke zu untersuchen. Neben der Erfüllung der Forderungen des Eisenbahnbundesamtes konnte mit dieser Dauermessung eine Vielzahl zusätzlicher interessanter Informationen über das Tragverhalten der Brücke gewonnen werden.

EÜ B6 Leipziger Straße in Halle Kanena - Probebelastung

Der Ersatzneubau der Eisenbahnüberführung der Strecke 6351 in km 0,915 über die Leipziger Straße in Halle (B6) wurde als eingleisiger Netzwerkbogen mit einer Stützweite von 79,00 m errichtet. Die Fahrbahn dieser Brücke ist eine Stahl-Beton-Verbundkonstruktion.



Bild 2: Probebelastung der EÜ B6 Leipziger Straße in Halle Kanena **Fig. 2:** Load test at the railway bridge EÜ Leipziger Straße in Halle Kanena

Entsprechend der Forderung des Eisenbahn-Bundesamtes war der Überbau nach seiner Fertigstellung einer Probebelastung zu unterziehen.

Als Belastungsfahrzeug dienten 2 Loks der Baureihe 232 mit jeweils 120 t (Bild 2), die verschiedene Laststellungen auf der Brücke einnahmen (Bild 3). Dabei wurden die Dehnungen in einigen Hängern, im Bogen und im Versteifungsträger gemessen (Bild 4) und mit den rechnerisch ermittelten Werten verglichen.

Zusätzlich wurde geodätisch die Durchbiegung der Brücke in Bauwerksmitte und in den Viertelspunkten gemessen.

Es zeigte sich, dass die Abweichungen der Hängerkräfte zwischen Berechnung und Messung bei maximal 8 % lagen. Dies ist in Anbetracht der Konstruktion der Fahrbahn als Betonplatte außerordentlich wenig. Die maximale gemessene Durchbiegung unter dem schweren Belastungszug lag bei ca. 14 mm = L/5700.



Bild 3: Laststellungen während der ProbebelastungFig. 3: Positions of load during the load test



Bild 4: gemessene Spannungen in einem Hängerstab [N/mm²] **Fig. 4:** Measured stresses of exemplary hanger bar [N/mm²]

EÜ Rosenbachtal – Bestimmung der Hängernormalkräfte mit Hilfe von Frequenzmessungen

Die EÜ Rosenbachtal ist eine Netzwerkbogenbrücke mit einer Stützweite von 89 m in einer eingleisigen Eisenbahnstrecke.

Die schrägen Hängerstäbe bewirken eine günstige gleichmäßige Verteilung und damit eine relativ geringe Beanspruchung des Bogens aus Verkehrslasten und gestatten damit eine leichte, Stahl sparende Konstruktion. Der Querschnitt der Hänger ist Flachstahl 140x40 mm.

Die Verkehrsfreigabe der Brücke erfolgte am 26. Oktober 2008.



Bild 5: Messung der Eigenfrequenzen der Hänger an der EÜ Rosenbachtal

Fig. 5: Measurement of eigenfrequencies of the hanger bars at Rosenbachtal bridge



Bild 6: Beschleunigungsverlauf und Frequenzspektrum eines Hängerstabes

Fig. 6: Evolution of acceleration and frequency spectrum of exemplary hanger bar

Aufgabe der Messung (Bild 5) war die Bestimmung der Normalkräfte in den Hängern infolge Eigengewicht und die Bestimmung der Dämpfungseigenschaften.

Bei seilartigen, d.h. relativ schlanken, vorgespannten Bauteilen, bietet sich mit der Frequenzanalyse die sehr einfache und elegante Möglichkeit, die Stabnormalkräfte auf Basis der Eigenfrequenzen zu bestimmen. Meist sind neben der ersten Harmonischen noch einige höhere Eigenfrequenzen messbar (Bild 6), die wichtige zusätzliche Informationen liefern.

Aufgrund des relativ großen Anteils der Biegesteifigkeit und der biegesteifen Lagerbedingungen der Hängerstäbe (besonders der kurzen Stäbe) ist eine einfache Berechnung der Seilkräfte mit

Hilfe der Saitengleichung nicht ausreichend genau bzw. würde bei den kurzen Stäben zu stark abweichenden Kräften führen.

Statt dessen führt eine Anwendung der folgenden Näherungsformel für die Schwingfrequenz der Ordnung k nach [6] zu genaueren Ergebnissen:

$$\begin{split} f_k = & \frac{k}{2L} \cdot \sqrt{\frac{N}{\mu}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{N \cdot L^2}} + \left(4 + \frac{k^2 \pi^2}{2} \right) \cdot \frac{EI}{N \cdot L^2} \right) \\ f_k & \dots & \\ k & \dots & \\ \text{Schwingeigenfrequenz k-ter Ordnung} \\ \text{Ordnung der Eigenfrequenz} \end{split}$$

L	 Länge des Stabes
N	 Normalkraft
μ	 längenbezogene Masse des Stabes
Ē	 Elastizitätsmodul
Ι	 Trägheitsmoment
	6

Wenn außerdem ein veränderlicher Querschnittsverlauf und unklare Einspannbedingungen vorliegen, bietet es sich an, die Eigenfrequenzen mit Hilfe eines FEM-Programmes (Bild 7) zu berechnen.



Bild 7: Eigenfrequenzen höherer Ordnung, FE-Modell zur Berechnung der EigenfrequenzenFig. 7: Eigenfrequencies of higher order, FE-Model for calculation of eigenfrequencies

EÜ Flora – Dauermessung an einer eingleisigen Netzwerkbogenbrücke

Die Eisenbahnüberführung Flora über den Mittellandkanal wurde als eingleisiger Netzwerkbogen mit einer Stützweite von 132,60 m gebaut (Bild 8).

Nach Modul 804.4101 (15) [7] ist für eingleisige Stahlüberbauten mit Entwurfsgeschwindigkeiten bis VE = 300 km/h eine Mindestquerbiegesteifigkeit erforderlich, die als Frequenzkriterium formuliert ist. In den Hintergründen [8] zu den Festlegungen der Richtlinie 804 wird als weiteres Kriterium die maximale seitliche Verformung unter Verkehr mit L/5000 angegeben.

Die rechnerisch ermittelte 1. Eigenfrequenz in Brückenquerrichtung lag relativ deutlich unter dem Grenzwert von 1,20 Hz.

Aufgrund der geringeren Entwurfsgeschwindigkeit VE = 120 km/h sollte eine untere Grenzfrequenz von 0,60 Hz festgelegt werden. Dieses von Modul 804.4101 (15) abweichende Vorgehen wurde durch ZIE (Zustimmung im Einzelfall) des Eisenbahnbundesamtes für die EÜ Flora zugelassen. In den Nebenbestimmungen der ZIE wurde die messtechnische Ermittlung der 1. Biegeeigenfrequenz der Horizontalschwingung des Überbaues sowie einer Dauermessung zur Beobachtung des Tragwerksverhaltens nach Inbetriebnahme der Brücke gefordert.

Die Messung der horizontalen und vertikalen Biegeeigenfrequenzen der Brücke wurde im Rahmen des Belastungsversuches am 07.04.2010 durchgeführt. In diesem Zuge wurden auch die Eigenfrequenzen der Hänger gemessen. Zusätzlich erfolgte im Rahmen einer Langzeitmessung von Mai bis Juli 2010 eine kontinuierliche Überwachung der Querschwingungen des Überbaues.



Bild 8: EÜ Flora über den Mittellandkanal, eingleisige Netzwerkbogenbrücke, 132 m Spannweite **Fig. 8:** Railway bridge EÜ Flora crossing the Mittellandkanal, single track network arch, 132 m span

Die Messung (Bild 9) erfolgte vorwiegend mit Beschleunigungsaufnehmern, die in horizontaler und vertikaler Richtung angeordnet wurden. Zusätzlich wurde mit induktiven Wegaufnehmern die horizontale Endtangente des Überbaues am Endquerträger gemessen.

Aus der Auswertung der Signale von 2 DMS an der Schiene konnten die Verkehrseinwirkungen (Triebfahrzeug, Achsanzahl, Gesamtgewicht, Fahrgeschwindigkeit etc.) identifiziert werden.

Um eventuell maßgebende Einwirkungen aus Wind erkennen zu können, wurde die Windrichtung und Windgeschwindigkeit gemessen. Weiterhin wurde in einem Querschnitt mit 10 Sensoren die Bauwerkstemperatur erfasst.

Die gemessenen Daten wurden am Bauwerk auf einem Datenlogger gespeichert und in regelmäßigen Intervallen per UMTS auf einem externen Fileserver abgelegt.



Bild 9: Konfiguration der Dauermessung

Fig. 9: Configuration of long-term measurement

Die größte vertikale statische Belastung erfährt das Tragwerk, wenn mit Schotter beladene Güterzüge aus einem nahe gelegenen Steinbruch die Brücke passieren. Die Meterlast dieser Züge liegt bei ca. 8 t/m bei Zuglängen bis ca. 680 m (Bild 10 und Bild 11).

In der Grafik (Bild 11) ist erkennbar, dass bei diesem schweren Zug die Achslasten der Wagen höher sind, als die der Triebfahrzeuge (vorn und hinten). Die Schiene wird wie der Versteifungsträger gedehnt, die Zugnormalspannungen in der Schiene betragen immerhin ca. 20 N/mm².

Aus der Messung der horizontalen Beschleunigungen (Bild 12) lassen sich die ersten beiden Eigenfrequenzen bestimmen (Bild 13). Es zeigt sich, dass die erste Eigenfrequenz (Bild 14) wesentlich höher liegt, als in der Berechnung und mit 1,07 Hz nur knapp unter den geforderten Grenzwert. Es zeigt sich weiterhin, dass aus Verkehrslasten die erste Eigenfrequenz nur sehr schwach angeregt wird. Die zweite Eigenfrequenz (Bild 14) mit 1,68 Hz liegt bereits deutlich über dem Grenzkriterium nach Richtlinie 804.



Bild 10: Signalverlauf eines DMS an der Schiene bei Überfahrt eines leeren Güterzuges **Fig. 10:** Signal sequence of a strain gauge at the rail during the crossing of a empty freight train





10







Bild 13: Frequenzspektrum der horizontalen BeschleunigungenFig. 13: Frequency spectrum of horizontal acceleration

12

Lfd. Nr.	Eigenfrequenz	Eigenform
1	berechnet (urspr. Modell): 0,68 Hz berechnet (verb. Modell): 1,11 Hz gemessen: 1,07 Hz	horizontale Eigenform, Bogen und Fahrbahn gleichläufig, symmetrisch (1 Halbwelle)
2	berechnet (urspr. Modell): 1,28 Hz berechnet (verb. Modell): 1,51 Hz gemessen: 1,68 Hz	vorwiegend horizontale Eigenform, Bogen und Fahrbahn gegenläufig symmetrisch (1 Halbwelle)

Bild 14: Eigenformen der Netzwerkbogenbrücke mit vorwiegend horizontalen Anteilen

Fig. 14: Eigenmodes of the network arch with predominantly horizontal displacements

Der Vergleich der Messung mit dem 2. Grenzkriterium ($u_y < L/5000$) erwies sich in der messtechnischen Umsetzung als nicht ganz so einfach, über die Art und Höhe der seitlichen Beanspruchungen herrschte weitgehend Unklarheit. Die Messung des "Seitenstoßes" im Rahmen einer Probebelastung ist nicht möglich, da es sich beim Seitenstoß um eine Ersatzlast handelt. Aus diesem Grund war ein Langzeitbetrieb zur Realisierung der Messaufgabe notwendig.

Die direkte dynamische Messung von Verschiebungen über dem Wasser war nicht realisierbar. Statt dessen wurde durch Integration der gemessenen Beschleunigungen die Verschiebung berechnet (Bild 15). Zusätzlich wurde die horizontale Winkelverdrehung des Endquerträgers gemessen, aus der ebenfalls auf die seitliche Auslenkung in Brückenmitte geschlossen werden sollte.

Es zeigte sich an den sehr geringen Lagerbewegungen deutlich, dass sich die Kalottengleitlager bei den seitlichen Schwingungen weitgehend wie Festlager verhalten. Damit ist auch die Ursache für die wesentlich höheren Eigenfrequenzen beschrieben.

Die maximalen seitlichen Verschiebungen (2,6 mm = L/50000) im Messzeitraum traten unter relativ leichten aber schnell fahrenden Güterzügen mit regelmäßigen Achsabständen auf (Bild 15).

Aus der Auswertung der Signalverläufe der DMS an der Schiene lassen sich weitere interessante Informationen gewinnen und Zusammenhänge deutlich machen, wenn automatisierte Analysemethoden eingesetzt werden (Bild 16).





Fig. 15: Horizontal displacements in the centre of the bridge during the measurement period





Quellen

- [1] GEIBLER, K.; BOLLE, G.; MARX, S.; KNAACK, H.-U.: Konzepte der Dauerüberwachung in den Regelwerken von Infrastrukturbetreibern., *5. Symposium "Experimentelle Untersuchungen von Bauwerkskonstruktionen"*, Dresden, September 2009.
- [2] GEIBLER, K.; STEIMANN, U.; GRABE, W.: Netzwerkbogenbrücken Entwurf, Bemessung, Ausführung., *Der Stahlbau*, H. 77 (2008), S. 158–171
- [3] JAHNKE, T. Die Fehmarnsundbrücke Wahrzeichen der deutschen Bauleistungen für die Vogelfluglinie, Sonderdruck aus Eisenbahntechnische Rundschau, H. 5/1963 und 2/1964
- [4] STEIN, P. Das Bogentragwerk der Fehmarnsundbrücke, *Stahlbau*, H. 34 (1965), S. 171-186
- [5] GAUTHIER, P.; KRONTAL, L.: Erfahrungen mit Netzwerkbogenbrücken im Eisenbahnbrückenbau., *Der Stahlbau*, H. 79 (2010), S. 199–208
- [6] GEIER, R.; PETZ, J.: Kraftbestimmung in Schrägseilen durch dynamische Messungen., *Beton- und Stahlbetonbau*, H. 99 (2004), S. 985–991
- [7] NORM RICHTLINIE 804, Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke planen, bauen und instand halten)., 2003
- [8] TRÖSCHEL, O.; DÖRING, A.: Grenzwerte der Quersteifigkeit von Überbauten stählerner Eisenbahnbrücken., *Signal und Schiene*, H. 33 (1989), S. 228-230