



**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 <i>Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i>	147
Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen mithilfe der dynamischen Eigenschaften <i>F. Weisleder, M. Waltering</i>	159
Softwareunterstützte Nachrechnung und Ertüchtigung von Brückenbauwerken <i>Stefan Kimmich, Eckhard Held</i>	175

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

Dr.-Ing. Klaus Brandes¹, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz²
Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau³

Kurzfassung. Mit einem auf Lagrange-Multiplikator-Tests basierenden Monitoring von Brücken ist es gelungen, in Belastungsversuchen an einer Holzbrücke (7,25 m Spannweite), an der relativ kleine Schädigungen künstlich herbeigeführt worden waren, die Zuverlässigkeit dieser Art des Monitorings zu bestätigen. Ausgangspunkte waren Messung von Durchbiegungen sowie Krümmungen und die Zusammenführung der jeweiligen Regression mit Nebenbedingungen, die den mechanischen Bedingungen gehorchen, unter Einschluss von Lagrange-Multiplikatoren, die sich als brauchbare Testparameter erwiesen.

Lagrange multiplier test for the detection of increasing structural damage: Experimental verification – Abstract. *Based on a Lagrange multiplier test, the detection of a small artificial damage of a bridge could be achieved. The experiment was performed on a timber bridge of 7,25 m span. During the loading test, deflections as well as curvatures were measured and the separately performed regression for both of them with a constraint condition basing on the mechanical laws was combined by introducing a Lagrange multiplier which proved to be an adequate test parameter.*

1 Erste Schritte zur Einbeziehung von Lagrange-Multiplikatoren als Testparameter

1.1 Brücken des neuen Hauptbahnhofs Berlin

Erste gedankliche Ansätze zu einer neuartigen Methode zur Detektierung von Schädigungen an Brücken kamen auf mit der Aufgabe, an den neuen Spannbetonbrücken des Hauptbahnhofs Berlin ein Monitoringsystem zu installieren, das über viele Jahre hinweg mögliche Schädigungen zuverlässig detektieren können sollte [1], Bild 1.

Bei der Analyse der verfügbaren Methoden verdichtete sich die Vermutung, dass die von etlichen Seiten propagierten sogenannten „baudynamischen“ Auswertungsmethoden durchaus ungeeignet waren, den Anforderungen gerecht zu werden. Nicht zuletzt die von der US-amerikanischen Federal Highway Administration 1993 durchgeführten Erprobungsversuche an einer zum Abriss vorgesehenen Straßenbrücke der Interstate I 40 bei Albuquerque stützten diese Vermutung [2].

¹ Dr.-Ing., Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB), Berlin

² Dipl.-Ing., Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB), Berlin

³ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin



Bild 1: Hauptbahnhof Berlin; Zustand während des Einbaus der Bügelbauten 2004

Foto: DONGES Stahlbau GmbH Darmstadt

Da von Beginn an das Messen verschiedenartiger mechanischer Größen an den Spannbetonbrücken vorgesehen war – insbesondere Durchbiegungen und Dehnungen –, stellte die nun entwickelte Zusammenführung der unterschiedlichen mechanischen Größen bei der Auswertung eine folgerichtige Erweiterung dar, die sich als unerwartet fruchtbar erweisen sollte. Nicht nur die Zusammenführung an sich stellte sich als sinnvoll heraus, sondern die bei der Auswertungsanalyse notwendigerweise eingeführten Lagrange-Multiplikatoren stellten sich als hilfreiche Elemente heraus, die als Testgrößen durchaus geeignet erschienen, auf Schädigungen hinzuweisen, wie es in anderen vergleichbaren Feldern der Wissenschaft keineswegs neu ist [3], [4], auch wenn die an dieser Stelle eingeführte Art der Modellierung in der Tat ungewöhnlich ist.

1.2 Mechanische und mathematische Modellvorstellungen

Die für die weitere Behandlung des Problems notwendigen Grundlagen wurden bereits 1991 vorgestellt (Einführung der Gesamt-Matrix-Formulierung) [5], wenn auch zu jener Zeit die Eigenheit der Lagrange-Multiplikatoren als Schädigungsparameter noch nicht erkannt worden war.

Hilfreich für die weitere Gestaltung der Modellierung erwies sich das von David Hilbert bereits 1919 hervorgehobene *Prinzip der Einfachheit* [6], dem im Weiteren weitgehend gefolgt worden ist. Darüber hinaus muss an dieser Stelle auch auf diesbezügliche Äußerungen von Hermann von Helmholtz hingewiesen werden, der auf die Notwendigkeit der Behandlung von physikalischen Problemen sowohl aus mathematischer als auch aus messtechnischer Sicht nachdrücklich hingewiesen hat [7]. Von Helmholtz war zu jener Zeit der erste Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin-Charlottenburg und prägte maßgeblich die Art der Behandlung von Problemen der Mathematischen Physik.

Im konkreten Fall bedeutete das, dass von einem statischen oder quasi-statischen Vorgang ausgegangen werden sollte und dass die jeweils einfachste Art der Formulierung gewählt wurde. Die Auswertung der Messungen basiert somit auf einfacher Regression für die unterschiedlichen physikalischen Größen und bei der Kopplung der entstehenden Normalgleichungen wird auf die Gesetze der Elastizitätslehre zurückgegriffen – im einfachsten Falle bei Balken auf die Balkenbiegetheorie von Jakob Bernoulli (Ende des 17. Jahrhunderts).

Einige Gedankenarbeit verlangt dabei die Forderung, dass die gewählten Regressionsfunktionen kompatibel sind, für den Balken also die Krümmung der zweiten Ableitung der Durchbiegung κ entspricht, Gl. (1).

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \kappa \quad (1)$$

Für die Darstellung konnte an dieser Stelle auf Sinusfunktionen zurückgegriffen werden, die den Vorteil aufweisen, dass die zweite Ableitung gleichartig zur Ursprungsfunktion ist und dass die mathematische Darstellung die Eigenheiten damit deutlich erkennbar werden lässt. Für die mathematische Behandlung ist von Bedeutung, dass es sich bei der Methode der kleinsten Quadrate um einen Variationsausdruck handelt und dass somit Nebenbedingungen in einfacher Weise hinzugefügt werden können, zusammen mit einem Lagrange-Multiplikator – wiederum dem Prinzip der Einfachheit folgend. Mit der Einführung der Gesamtmatrix wird auch ein Bezug zu den Eigenheiten der Konstruktion möglich.

2 Vorlaufender Test an der TU Dresden zur Erprobung des Gesamtkonzepts

2.1 Beschreibung der Versuchsanordnung

An der TU Dresden wurde ein Balken aus Kunstharz-Pressholz (KHP) in gleicher Weise konzipiert und mit Sensoren bestückt, wie es dann später für die zu untersuchende Brücke vorgesehen war. Die Ergebnisse von Belastungsversuchen sollten dann als Planungsvorgaben für die späteren Brückenversuche dienen. Im Gegensatz zu der späterhin geplanten Fußgängerbrücke wurde die Belastung an zwei Punkten in einer Balkenprüfeinrichtung aufgebracht. Die Einzelheiten gehen aus dem Foto in Bild 2 hervor und wurden bereits in [8] beschrieben.



Bild 2: Belastungsversuch an der TU Dresden; zu erkennen sind die drei Durchbiegungsaufnehmer sowie die Lasteinleitung über einer lastverteilenden Traverse.
Foto: TU Dresden

Die Geometriekennwerte können ebenso wie die Anordnung der Sensoren zur Messung der Dehnungen (Bild 3) entnommen werden. In der

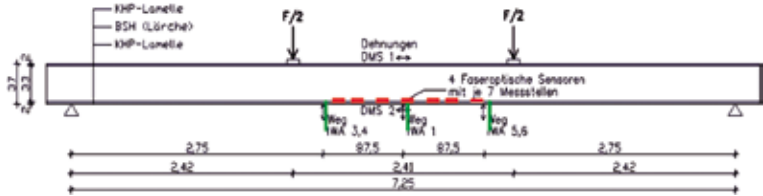


Bild 3: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Fuge zwischen der Pressholzlamelle und den Schichten aus unverdichtetem Lärchenholz sind parallel geführte Faser-Bragg-Gitter eingeklebt [9]. Die Sensorelemente haben einen gegenseitigen Abstand von 25 cm.

Aus den Messwerten für die Dehnungen werden die Krümmungen der Balkenachse ermittelt, Gl. (2), wobei z der Abstand des Sensors von der neutralen Faser des Balkens (hier: Balkenmitte) ist.

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{z} \quad (2)$$

Die Dehnungsmessstreifen oben und unten (DMS 1 und DMS 2) dienen speziell der Bestimmung der neutralen Faser im Balken.

Der zeitliche Ablauf der Belastung im Versuch geht aus dem Kraft-Zeit-Diagramm (Bild 4) hervor. Insgesamt dauerte der Versuch über 5100 s. Dargestellt sind die gemessene Kraft sowie die späterhin etwas korrigierte Anzeige dafür, s. a. [8].

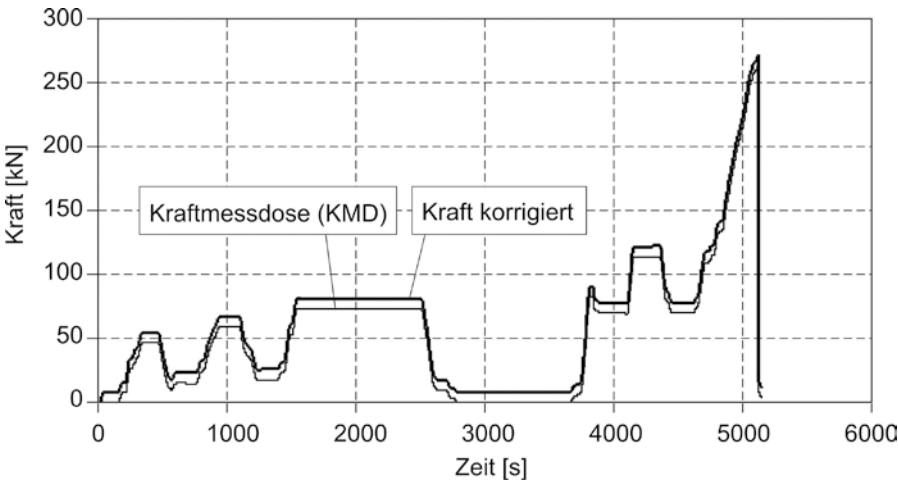


Bild 4: Zeitlicher Verlauf der Belastung im Versuch, [8]

2.2 Auswertung der Messergebnisse

Zu verschiedenen Zeitpunkten des Belastungsversuchs wurden die Durchbiegung über Regression der entsprechenden Messwerte und die Krümmung des Balkens – aus den Dehnungswerten der unteren FBG – über Regression der entsprechenden Messwerte bestimmt. Als Regressionsfunktionen wurden jeweils Sinuskurven gewählt.

Zwischen den Durchbiegungen und den Krümmungen besteht entsprechend Gl. (1) und mit Bezug auf die Ansatzfunktionen, z. B. $w = W_0 \cdot \sin(\pi \cdot x / l)$; $\kappa = K_0 \cdot \sin(\pi \cdot x / l)$, die Beziehung

$$W_0 = \frac{K_0}{(\pi \cdot l)^2} \quad (3)$$

und diese Beziehung wird – versehen mit einem Lagrange-Multiplikator λ – in die Rechnung eingeführt.

Es stellte sich heraus, dass diese Größe, bezogen auf die Mittendurchbiegung, durch alle Belastungsstufen unverändert blieb, eine Eigenheit, die sie als Testparameter für Änderungen des Verhaltens bei Schädigung geeignet erscheinen ließ, Bild 5.

Die Anordnung der Auswertungsergebnisse in einer Gesamtmatrix führt zu einer sehr übersichtlichen Darstellung und hat sich bei den bisherigen Anwendungen bereits bewährt. Wie ein Blick auf die Auswertung in Bild 5 erkennen lässt, bleibt der Parameter λ / W_0 sehr stabil. Beim letzten Wert zum Zeitpunkt 4750 s zeigte der Versuchsbalken bereits leichte Schäden, so dass von einem Abweichen vom linearen Verhalten ausgegangen werden muss.

Um einen ersten Eindruck davon zu erhalten, wie sich eine simulierte Vergrößerung eines Messwertes auf das Ergebnis auswirkt, ist für einen Messpunkt die Dehnung auf den vierfachen Wert erhöht worden, was sich im Ergebnis für den Parameter λ / W_0 deutlich abzeichnet.

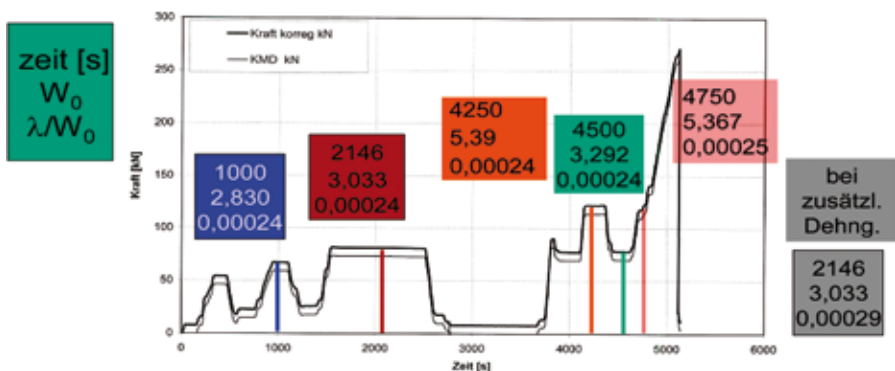


Bild 5: Ermittlung des Wertes λ / W_0 in Abhängigkeit vom Fortgang des Versuches

3 Erweiterung des Verfahrens auf durchlaufende Brückenbalken

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde die Entwicklung durch die Beschäftigung mit den Spannbetonbrücken des Hauptbahnhofs in Berlin angeregt, bei dem es sich um durchlaufende Balken handelte, Bild 6. Bei diesem Beispiel wurden als Ansatzfunktionen für die Regression Hermite'sche Interpolationspolynome für die Durchbiegung verwendet, Bild 7. Nach zweifacher Ableitung entstehen für die Krümmung lineare Kurvenzüge, die für die weitere Berechnung zu verwenden sind.

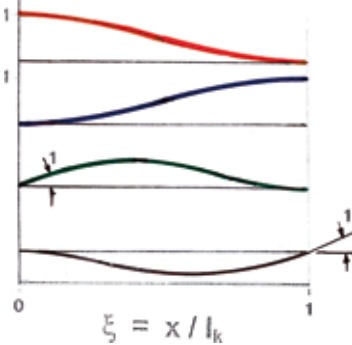


Bild 7: Darstellung der vier hier verwendeten Hermite-Polynome für die Durchbiegung

Mit dieser Art der Regression können durchlaufende Balken modelliert werden, indem für die Rand- und Übergangsbedingungen wiederum Nebenbedingungen eingeführt werden, ebenfalls mit Lagrange-Multiplikatoren, die aber eine andere Art der Deutung verlangen als diejenigen, die zwischen Krümmungen und Durchbiegungen vermitteln.

Für den mittleren Bereich der Spannbetonbrücken am Hauptbahnhof Berlin, dargestellt in Bild 6, ergibt

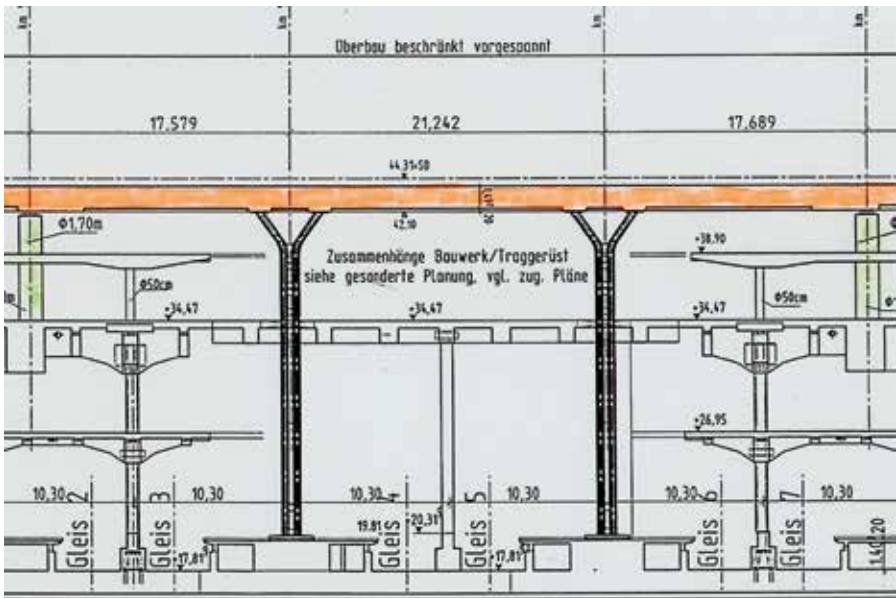


Bild 6: Brückensystem im mittleren Bereich des Hauptbahnhofs Berlin; zur Vereinfachung werden über den Gabelstützen einfache Lager angenommen

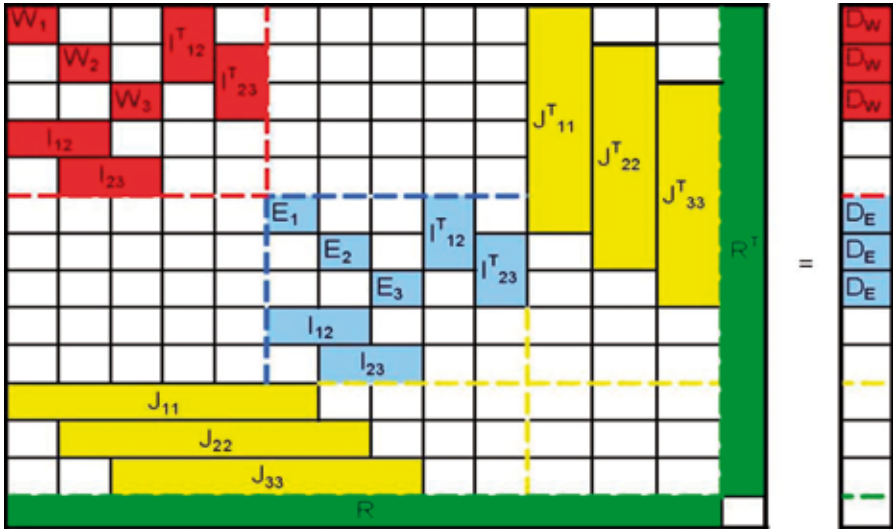


Bild 8: Gesamtmatrix für den mittleren Bereich der Brücken am Hauptbahnhof Berlin mit den Normalgleichungen für die Durchbiegungen (rot) und die Krümmungen (blau), [10]

regression function $r(\xi)$ left element i with $\xi = 1$ right element j with $\xi = 0$

$$r(\xi) = \begin{cases} \text{displacements } W \\ \text{strains } E \end{cases}$$

with:

internal coupling matrix I_{ik}

$r(\xi)$	0	1	0	0	-1	0	0	0
$r'(\xi)$	0	0	0	$1/l_i$	0	0	$-1/l_k$	0
$r''(\xi)$	$6/l_i^2$	$-6/l_i^2$	$2/l_i^2$	$4/l_i^2$	$6/l_k^2$	$-6/l_k^2$	$4/l_k^2$	$2/l_k^2$

element W_m with ξ being $0 \leq \xi \leq 1$ element E_m

external coupling matrix J_{nm}

$$\begin{bmatrix} -6+12\xi & 6-12\xi & -4+12\xi & -2+12\xi & \dots & 1-3\xi^2+2\xi^3 & 3\xi^2-2\xi^3 & \xi-2\xi^2+3\xi^3 & -\xi^2+\xi^3 \end{bmatrix}$$

Bild 9: Kopplungsmatrizen wie in Bild 8 benannt

sich dann eine Gesamtmatrix entsprechend Bild 8. Die Kontinuitätsbedingungen zwischen den benachbarten Elementen sind mit I^T bezeichnet, diejenigen für die Randbedingungen (constraints) mit J^T und die für die Randbedingungen mit R^T .

4 Verifikation an einem Brückenbalken mit künstlicher Schädigung

Die Messungen an den Spannbetonbrücken des Berliner Hauptbahnhofs konnten eine Bestätigung für das Zutreffen der entwickelten Methode nicht erbringen, weil keinerlei Schäden

während der Zeitspanne der laufenden Messungen aufgetreten sind – glücklicherweise für die Brücken –, aber auch ohne die Möglichkeit für eine Bestätigung der entwickelten Methode. So blieb nur die Möglichkeit, an einer Brücke durch künstliche Schädigung die Auswirkung auf die Messwerte für das mechanische Verhalten erkennbar werden zu lassen.

Die Gelegenheit ergab sich, als an einer Holzbrücke in hybrider Bauweise mit Brettschichtholzträgern (Bild 10) Langzeituntersuchungen stattfanden und nach deren Beendigung die Brücke für Untersuchungen der angestrebten Art verfügbar wurde.

Die Brücke besitzt an der Ober- und der Unterseite jeweils eine Lamelle aus Kunstharzpressholz (KHP), deren Elastizitätsmodul um den Faktor sieben größer ist als derjenige der mittleren Lamellen. Die Sensorapplikationen waren in gleicher Weise vorgenommen worden wie bei dem in Dresden untersuchten Balken, und so konnte die Versuchsdurchführung in gleicher Art erfolgen. Die Sensoranordnung entspricht derjenigen in Bild 3, lediglich die Belastungsanordnung wurde verändert, indem mittig eine Belastung mit einem eine Tonne wiegenden Gewicht erfolgte.

Gegenüber der simulierten Messwertveränderung bei dem Balken im Dresdener Versuch konnte jetzt natürlich auch der Wert für die Durchbiegung gemessen werden, ein Effekt, der unbedingt als Teil des Gesamtsystems zu verfolgen ist. Hinzu kam die Frage, inwieweit sich bei den Messungen, die im Zeitraum von mehreren Jahren stattfanden, das gesamte Messsystem verändern würde, ein wesentlicher Teil der Untersuchungen, der zuvor noch nicht verfolgt werden konnte.



Bild 10: Brettschichtholzträger auf dem Testgelände der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit Schädigung durch zwei Bohrlöcher Foto: Hofmann, Brandes

In der Tabelle 1 sind die wesentlichen Daten zusammengestellt, die ausweisen, dass sich in der Zeit vom Oktober 2012 bis zum März 2014 die Werte für den Testparameter λ / W_0 kaum veränderten und erst nach der Anbringung der Bohrlöcher (Schädigung 1 in Bild 11) eine Änderung des Testparameters erkennbar wurde, was auch in der Diagrammdarstellung in Bild 11 zu finden ist, [11].

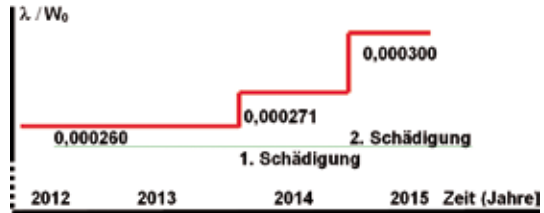


Bild 11: Darstellung der Veränderung des Parameters λ / W_0 als Kriterium für eine Systemänderung bzw. Schädigung, nach [11]

Tabelle 1: Ergebnisse der Belastungstests 2012 und 2014

Datum und Uhrzeit	Testparameter	Bemerkung
11.10.2012	0,000260	Keine Schädigung
06.03.2014 (1710 s)	0,000260	Keine Schädigung
06.03.2014 (2250 s)	0,000260	Keine Schädigung
06.03.2014 (6150 s)	0,000260	Keine Schädigung
14.04.2014	0,000271	1. Schädigung wie in Bild 10
Future date	0,000300	Sägeschnitt von 1 cm von unten bei einem zukünftigen Versuch (geplant für Sommer 2015)

5 Erweiterung der Methode für eine breitere Anwendung

Dass die vorgestellte Methode für balkenförmige Strukturen mit dominantem Effekt durch Belastung erfolgversprechend sein dürfte, konnte verifiziert werden. Wie aber gelingt die Modellierung z. B. bei Fachwerkbrücken, von denen es noch sehr viele altbewährte Exemplare gibt und die in aller Regel einer relativ hohen Ermüdungsbelastung ausgesetzt sind? Beispielhaft soll die Problematik an einem relativ langen Teil des U-Bahn-Viadukts in Berlin-Kreuzberg erläutert werden.

Für diese Konstruktion hatten Gutachter einen möglichst baldigen Ersatz verlangt, ohne sich wirklich mit den Eigenheiten der Konstruktion befasst zu haben. Die zuständige Berliner Senatsverwaltung hatte Zweifel an dem Zutreffen des Gutachtens und beauftragte dann die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zusammen mit dem Ingenieurbüro Prof. Dr. Lorenz & Co. Bauingenieure GmbH Berlin mit einer grundhaften Bewertung, die dann in den Jahren 1996 bis 1999 erfolgte und die die früheren Aussagen als unhaltbar bezeichnete. Im Detail ist das Ergebnis in einem Sonderheft der Zeitschrift *Der Stahlbau* erschienen (Heft 2/2002 zum 100-jährigen Bestehen der U-Bahn in Deutschland [12]).

Charakteristisch für die Arbeiten, die an dem Viadukt durchgeführt wurden, war eine detaillierte Inspektion, eine durchgreifende messtechnische Untersuchung über die gesamte Länge von etwa 200 m, die Definition aller Teile, die besonders hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind, und – völlig neuartig – die radiographische Untersuchung der höchstbeanspruchten Punkte mit Gammastrahlen. Dieses Verfahren war zuvor in der BAM an originalen Fachwerkträgern in Dauerschwingversuchen in eigens entwickelten großen Prüfmaschinen erprobt worden [12].

Als Ergebnis wurde festgestellt, dass nur an einem Punkt der realen U-Bahn-Konstruktion – von etwa 50 untersuchten – Risse entdeckt werden konnten. Wichtiger noch war, dass für zukünftige Hauptprüfungen derartige radiographische Untersuchungen empfohlen wurden mit genauen Angaben jener Punkte an der Konstruktion und dem zeitlichen Abstand zwischen derartigen Wiederholungsprüfungen. Gerade im vergangenen Jahr haben diese Wiederholungsprüfungen stattgefunden, dieses Mal im Auftrag der BVG (Berliner Verkehrsbetriebe), womit ein neues Kapitel der Langzeitbeobachtung aufgeschlagen sein dürfte.

Doch zurück zum Langzeitmonitoring an derartigen Brücken. Aus dem grundsätzlichen Sachverhalt ist zu folgern, dass sowohl Dehnungen an sensiblen Konstruktionspunkten gemessen werden müssen als auch Durchbiegungen der Gesamtkonstruktion, und dass diese Messwerte in einen mechanischen Zusammenhang gebracht werden müssen, wie ihn beispielsweise Cremona- und Williotplan anbieten. Zur Verwirklichung dieses Untersuchungsplans werden derzeit Fördermittel beantragt. Eine Zusage gibt es leider noch nicht.

Aus den umfangreichen Ermüdungsversuchen an originalen Fachwerkbrücken der Berliner U-Bahn konnten bereits wichtige Informationen gewonnen werden, an welchen Punkten typischer Konstruktionen mit ersten Rissen bei Ermüdungsbeanspruchung gerechnet werden muss, Bild 12. Bei den Konstruktionsformen mit einem mittig angeordneten Knotenblech ist vorwiegend an den Knotenblechen mit ersten Rissen zu rechnen. Die späterhin verwendeten doppelwandigen Fachwerkträger weisen dagegen aber erste Risse an den höchstbeanspruchten Zugstäben auf.

Bild 12 lässt deutlich werden, dass verdeckte Risse in der Tat erst erkennbar werden, wenn sie bereits eine beachtliche Länge erreicht haben [12]. In dem dargestellten Fall übertrug die gerissene Konstruktion noch die volle Kraft des Zugstabs in dem Fachwerk. Bei einer Dehnungsmessung an dem Knotenblech hätte die Rissausbreitung bereits sehr viel eher bemerkt werden können.

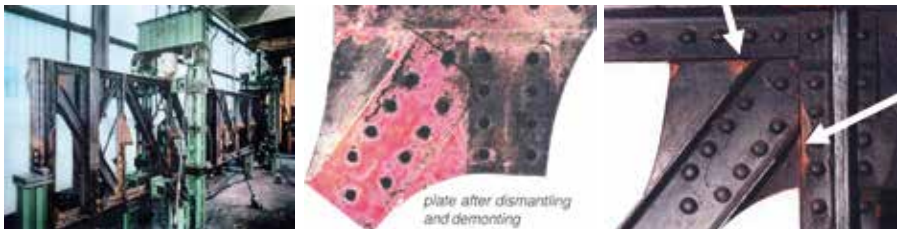


Bild 12: Ermüdungsversuch an der BAM 1994 an einem originalen U-Bahn-Brückenteil zur Erkundung der konstruktiven Schwachpunkte
Fotos: BAM

6 Folgerungen und Ausblick

Nach langwierigen Überlegungen und so manchen Diskussionen konnte ein erfolgversprechender Ansatz gefunden werden, die Ausbreitung von Schädigungen zu erkennen.

Die bisherigen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass mit der neu entwickelten Methode ein zuverlässiges Monitoring für Brücken erreichbar ist. Eine Weiterentwicklung der begonnenen Arbeiten erscheint in diesem Lichte sinnvoll und für das Monitoring der Verkehrsinfrastruktur dringend erforderlich. Es bedarf aber sehr wohl noch einiger Anstrengungen.

Referenzen

- [1] Brandes, K.; Daum, W.: Langzeit-Monitoring an den Spannbetonbrücken des neuen Hauptbahnhofs Berlin. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 115 (2008), S. 21–28.
- [2] Farrar, Ch. R.; Worden, K.: An introduction to structural health monitoring. Phil Trans. Royal Soc. A (2007) 365, S. 303–315.
- [3] Silvey, S. D.: The Lagrangian Multiplier Test. The Annals of Math. Stat. 30 (1959) 2, S. 389–407.
- [4] Karabulut, H.: The physical meaning of Lagrange multipliers. Eur. Phys. 27 (2006) 709–718.
- [5] Brandes, K.; Berner, K.: Gesamtmatrix-Formulierung für hybride experimentell-analytische Verfahren. Bautechnik 68 (1991), S. 198–201.
- [6] Hilbert, D.: Natur und mathematisches Erkennen: Vorlesungen. Gehalten 1919–1920 in Göttingen. Hrsg. von D. E. Rowe, Birkhäuser, 1992.
- [7] Helmholtz, H. v.: Vorlesungen über Theoretische Physik. Hrsg. von König, A. et al., Verlag von J. A. Barth, Leipzig, 1903, Bd.1.1.
- [8] Untergutsch, A.; Brandes, K.: Monitoring zur Strukturschädigung: Detektierung mittels Lagrange-Multiplikator-Test. In: Curbach, M. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB), 9.9.2011 in Dresden, Eigenverlag, 2011, 217–229.
- [9] Hamann, M.; Kubowitz, P.; Habel, W.; Hofmann, D.: Ersteinsatz von optischen Messfasern in Holzbaustoffen. BMBF-Vorhaben 0330722B.Bln.2013.
- [10] Brandes, K.; Buchhardt, F.; Daum, W.: Monitoring of bridges by advanced methods of experimental-mechanical symbiosis. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Proceedings IASBE-Symposium Weimar, 19.–21.9.2007 in Weimar, 2007, S. 208/209.
- [11] Brandes, K.; Daum, W.; Hofmann, D.; Kubowitz, P.: Lagrange Multiplier Test for Structural Damage of Bridges. In: Proceedings of 31st Danubia-Adria Symposium on Experimental Mechanics, 24.–27.9.2014 in Kempten (Germany), 2014, S. 213–214.
- [12] Brandes, K.; Lorenz, W. (Hrsg.): Stahlbau 71 (2002) 2, Spezialheft zum 100. Geburtstag der Untergrundbahn in Deutschland.