



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43



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

**9. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

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

**9. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE
UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43

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. Bernd W. Zastra

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 65 68

Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer
Korrekturen: Angela Heller
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan
Titelfoto: Sabine Wellner, bearbeitet von Sven Hofmann

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

Redaktionsschluss: 31. August 2017

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, 21. September 2017

ISSN 1613-6934

Inhalt

Vorwort <i>Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	5
Willy Gehler als Protagonist der experimentellen Bauwerksuntersuchung <i>Oliver Steinbock</i>	7
Das Potenzial thermo-mechanischer Messungen für die Werkstoffcharakterisierung <i>Volker Wetzka, Franziska Pannasch</i>	23
Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie <i>Helena Eisenkrein-Kreksch, Florian Bavendiek</i>	39
Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München <i>Hermann Weiher, Katrin Runtemund, Christian Glomp</i>	49
Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken <i>Max Käding, Marc Wenner, Steffen Marx</i>	63
Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen <i>Sabine Koch, Axel Dominik, Jessica Klinkner, Clara-Maria Nocker, Domenika Baroness von Kruedener, Pascale Dominik</i>	75
Untersuchungen im Rahmen der geplanten Ertüchtigung zweier Pfeiler des St.-Marien-Doms Zwickau <i>Michael Kühn, Peter Schöps</i>	93
Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen <i>Dirk Sperling, Hauke Schmidt</i>	113
Ludwig-Erhard-Anlage Frankfurt a. M. – Belastungsversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit historischer Rippendecken <i>Peter Braun, Gunter Hahn, Gerd Kappahn, Edyta Wünsch</i>	123
Durchführung von Belastungsversuchen an einbetonierten Ankerschienen in Spannbetonbindern <i>Marco Tschötschel, Bente Ebsen</i>	135
Der Löwenhof in Dortmund – Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken <i>Martin Gersiek, Marc Gutermann, Friedhelm Löschmann, Marcus Patrias</i>	143

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring <i>Robert Herold, Elke Reuschel, Peter Bauer</i>	157
Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke <i>Gregor Schacht, Jens Piehler, Erik Meichsner, Steffen Marx</i>	169
Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme <i>Klaus Brandes, Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i>	183
Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probenbühnenbodens der Semperoper Dresden <i>Tino Kühn, Marcus Hering, Heiko Wachtel, Sabine Wellner</i>	189
Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden <i>Sabine Wellner, Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	207
Übersicht KID-Hefte	215

Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme¹

Klaus Brandes², Petra Kubowitz³,
Werner Daum⁴, Detlef Hofmann⁴, Frank Basedau⁴

Zusammenfassung: Health monitoring von größeren Strukturen erfordert die Betrachtung der gesamten Struktur, indem sowohl jener Bereich, der experimentell behandelt wird, als auch derjenige, der einer analytischen mechanischen Untersuchung unterzogen wird, in einem Gesamtzusammenhang erfasst wird. Die umfassende Behandlung des Problems gelingt dann in einer Gesamtmatrix, die im Beitrag vorgestellt wird. Auf eine Erweiterung der Methode zur Detektierung anwachsender Schädigungen wird hingewiesen.

Summary: *Advanced structure modelling of bridges with adaptive mathematical models to solve current still unsolved problems.* Health monitoring of large structures requires the dealing with an entire structure by the combination of the analysis of regions which are equipped with sensors and other regions which are only subject of analytical treatment. The comprising treatment of the problem in only one complete matrix is topic of the contribution. An extension of the method to searching for growing damage in structural members is emphasised.

Vorbemerkung und Anknüpfung an Vorhandenes

Basierend auf Anmerkungen von Kurt Klöppel aus den 1930er Jahren zur Frage der Ausgewogenheit von Berechnungsverfahren und zum Kenntnisstand hinsichtlich der Materialeigenschaften bei der mechanischen Analyse von Brückenkonstruktionen – seinerzeit fokussiert auf stählerne Tragwerke [1] – ist beim IaFB daran gearbeitet worden, die Grundlagen für eine angemessene Balance von Analyseverfahren und Materialwissenschaften zu erweitern.

Diese Bemühungen konnten erst gelingen, als die gedanklichen Ansätze um das Element der mechanisch-mathematischen Nebenbedingungen, zusammen mit Lagrange-Multiplikatoren, einbezogen wurden. Dann aber hat sich dieser Weg als unerwartet fruchtbar erwiesen, sowohl hinsichtlich der Modellierungserweiterung als auch der neuartigen Formulierung erweiterter Vorstellungen zur Detektierung von Schädigungen, die sich in Konstruktionsteilen ausbreiten.

1 Der Beitrag stellt eine Erweiterung des Beitrags der gleichen Autorengruppe zum 8. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ vor 2 Jahren [2] dar und fußt unverändert auf dem Gedanken, nebeneinander unterschiedliche Variationsformulierungen einzuführen; eine Methode, die immer dann erfolgreich ist, wenn gleiche physikalische Größen zugrunde liegen. Vor zwei Jahren war erst ein erster Schritt erreicht worden, der nun zu einer Erweiterung ausgebaut worden ist.

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

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

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

Die bei Hilbert und Courant [3] zu findende Verkürzung der Lagrangeschen Methode: „Die Lagrangesche Methode ist nichts als eine besonders elegante Umgehung der lästigen, zur Unsymmetrie zwingenden Forderung, mit Hilfe der Nebenbedingungen ... [einige] der Variablen ... zu eliminieren“ sollte im Folgenden erweitert werden, um so Ausweitungen der Modellierung für komplexere Strukturen zu ermöglichen. Beispielhaft soll dieser Vorgang für zwei Fälle vorgestellt werden, der aber sicher auch für andere Fragestellungen anwendbar sein dürfte, auch wenn dafür jeweils einige neue Überlegungen notwendig sein dürften. Zugleich wurde dem Hinweis von Hilbert gefolgt, bei den Gedankenmodellen jeweils den einfachsten Modellen den Vorzug zu geben [4].

1 Relevanz der Problemstellung – konkrete aktuelle Fragestellungen

Bei den in den vergangenen Jahren zunehmend aufkommenden Fragen, die durch Kombination von mechanisch-mathematischer Analyse und experimenteller Methoden einer Lösung zugeführt werden sollten, stellte sich heraus, dass die methodischen Grundlagen keineswegs ausreichend waren, um die erhofften Erfolge zu erreichen. Um aber im Feld des health monitoring voranzukommen, war hier neue Entwicklung notwendig, und zwar in den Grundlagen. Insbesondere betraf das die Verfolgung von Schädigungsausbreitung in Brücken.

Es ist der Federal Highway Administration (FHWA) der USA zu danken, durch die Offerte, eine Straßenbrücke zur Verfügung zu stellen, um daran Versuche zur Verifikation von experimentellen Verfahren auszuführen, die Diskussion zu einem Ende zu bringen [5]. Zwar konnte damit die seinerzeit hoch favorisierte Methode der modalen Analyse keineswegs bestätigt werden, wer aber gehofft hatte, dass neue Methoden entwickelt werden würden, wurde enttäuscht.

Eine andersartige Fragestellung tauchte auf, als für die Kopplung von mechanisch-mathematischer und experimenteller Analyse von Brücken nach einer übergreifenden Formulierung gesucht wurde, da bei größeren Brückenkonstruktionen nur Teile mit Sensoren versehen werden können (Langzeit-Monitoring an den Spannbetonbrücken des neuen Hauptbahnhofs Berlin, Bilder 1 und 2, [6]).



Bild 1: Blick auf den Berliner Hauptbahnhof vom Helikopter aus; gut sichtbar: die auf den äußeren Brücken aufgelagerte Bahnhofshalle

Foto: Benjamin Janecke, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons (Ausschnitt)

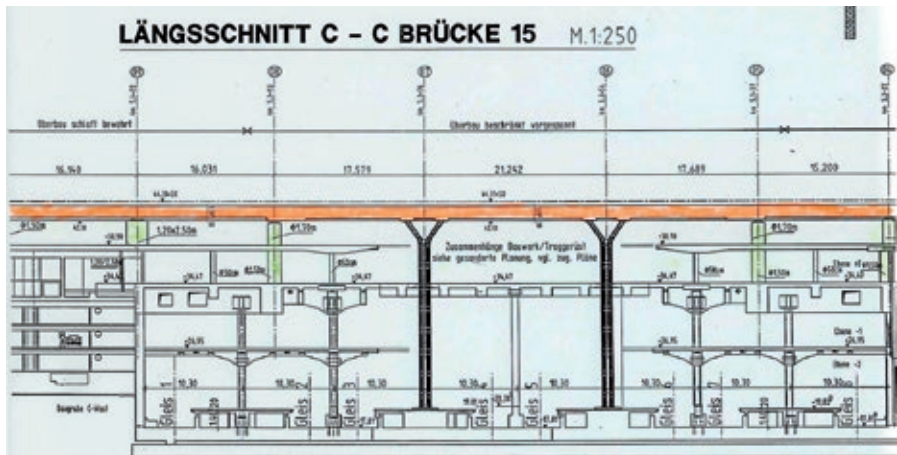


Bild 2: Längsschnitt der Spannbetonbrücken des Hauptbahnhofs Berlin (Ausschnitt)

Zeichnung: [8]

In beiden Fällen bot es sich nun an, auf Variationsformulierungen zurückzugreifen und die entstehenden Ausdrücke über Nebenbedingungen, verbunden mit Lagrange-Multiplikatoren, miteinander zu verbinden, über die bereits bekannte Methodik allerdings hinausweisend.

2 Experimentelle Untersuchungen von IaFB und BAM – Verifikation an einem Brückenbalken mit künstlicher Schädigung

Nun lassen sich Experimente der hier erforderlichen Art sinnvollerweise nur an konkreten Konstruktionen vorstellen, und so traf es sich außerordentlich günstig, dass am IaFB gerade eine längere Versuchsreihe an einem Brettschichtholz-Brückenträger – in Zusammenarbeit mit der BAM – soweit fortgeschritten war, dass anschließend weitere Versuche an dieser Brücke geplant werden konnten, Bild 3, s. a. [2].

Die Messungen an den Spannbetonbrücken des Berliner Hauptbahnhofs konnten eine Bestätigung für das Zutreffen der 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. Dem Prinzip der Einfachheit wurde insofern gefolgt, als ein statischer Zustand betrachtet wurde und zugleich eine relativ hohe Belastung aus Verkehr betrachtet wird, so dass vorhandene Schädigungen aktiviert werden – ganz im Gegensatz zur modalen Analyse.

Die Gelegenheit ergab sich, als an einer Holzbrücke in hybrider Bauweise mit Brettschichtholzträgern Langzeituntersuchungen stattfanden und nach deren Beendigung die Brücke für



Bild 3: Brettschichtholzträger auf dem Testgelände der BAM mit Schädigung durch zwei Bohrlöcher. Die Brücke besitzt an der Ober- und Unterseite jeweils eine Lamelle aus Kunstharzpressholz (KHP), deren Elastizitätsmodul um den Faktor 7 größer ist als derjenige der mittleren Lamellen. Fotos: Klaus Brandes

Untersuchungen der angestrebten Art verfügbar wurde. Die Sensorapplikationen waren in gleicher Weise vorgenommen worden wie bereits bei dem in Dresden untersuchten Balken [9], und so konnte die Versuchsdurchführung in gleicher Art erfolgen. Die Sensoranordnung entspricht derjenigen in Bild 4, [9], lediglich die Belastung wurde verändert, indem mittig eine Belastung mit einem 1-t-Gewicht erfolgte.

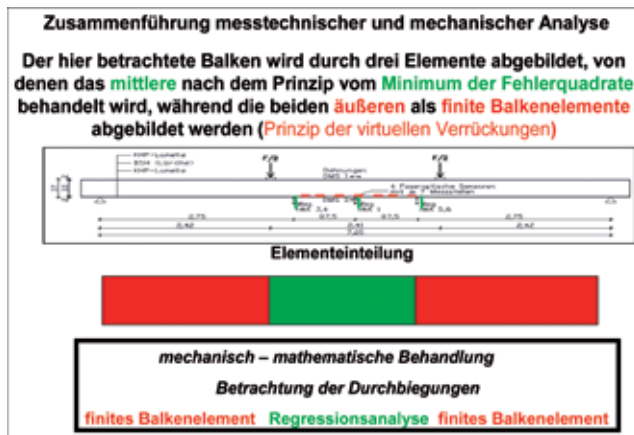


Bild 4: Schaubild zur Verdeutlichung des Zusammenführens von experimenteller (grün) und mechanisch-analytischer (rot) Behandlung Grafik: Klaus Brandes

3 Details zur Durchführung der Berechnung

Für die experimentelle Analyse wurden Hermitesche Interpolationspolynome 4. Ordnung verwendet. Wegen der vorauflaufenden Experimente waren nur jeweils drei Messpunkte vorgesehen und so mussten zur Vervollständigung der notwendigen Überbestimmung des Gleichungssystems zwei zusätzliche Messwerte interpoliert werden. Bei Rückgriff auf die-

befriedigenden Ergebnissen führen. Es bedarf aber doch einiger Gedankengänge, die von dem Üblichen abweichen. Es lohnt aber, sich auf neue Wege zu begeben, wie die Ergebnisse ausweisen.

Literatur

- [1] Klöppel, K.: Gemeinschaftsversuche zur Bestimmung der Schwellzugfestigkeit voller, ge-
lochter und genieteteter Stäbe aus St 37 und St 52. Der Stahlbau 9 (1936) 13/14, S. 97–112.
- [2] Brandes, K.; Kubowitz, P.; Daum, W.; Hofmann, D.; Basedau, F.: Lagrange-Multiplika-
tor-Test zur Detektierung zunehmender Strukturschädigung: Experimentelle Verifikation.
In: Curbach, M.; Opitz, H.; Scheerer, S.; Hampel, T. (Hrsg.): Tagungsband zum 8. Sym-
posium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen, 24.9.2015 in Dresden,
erschienen in der Reihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden kid, Heft 40, 2015, S. 147–
157.
- [3] Courant, R.; Hilbert, D.: Methoden der Mathematischen Physik I. Berlin: Springer, 1968
(dort S. 140).
- [4] Rowe, D. E. (Hrsg.): David Hilbert – Natur und mathematisches Erkennen. Vorlesungen
gehalten 1919–1920 in Göttingen, Birkhäuser, 1992.
- [5] Farrar, C. R.; Jauregui, D. A.: Comparative study of damage identification algorithms ap-
plied to a bridge – I: Experiment. Smart Mater. Struct. (1998) 7, pp. 704–719.
- [6] Brandes, K.; Daum, W.: Langzeit-Monitoring an den Spannbetonbrücken des neu-
en Hauptbahnhofs Berlin. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 115 (2008),
S. 21–28.
- [7] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BerlinHauptbahnhof.jpg>.
- [8] Brandes, K.; Daum, W.; Hofmann, D.; Kubowitz, P.: Lagrange Multiplier Test for Structu-
ral Damage of Bridges. In: Proc. of the 31st Danubia-Adria Symposium on Advances in
Experimental Mechanics, 24.–27.9.2014 in Kempten, 2014, pp. 213–214.
- [9] Untergutsch, A.; Brandes, K.: Monitoring zur Strukturschädigung: Detektierung mittels
Lagrange-Multiplikator-Test. In: Curbach, M.; Opitz, H.; Scheerer, S.; Hampel, T. (Hrsg.):
Tagungsband zum 6. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstrukti-
onen, 9.9.2011 in Dresden, erschienen in der Reihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
kid, Heft 24, 2011, S. 217–229.
- [10] Mathiak, F. U.: Die Methode der finiten Elemente (FEM) – Einführung und Grundlagen.
Vorlesungsskript, HS Neubrandenburg – online: [http://mechanik-info.de/dokumente/
Skript_FEM.pdf](http://mechanik-info.de/dokumente/Skript_FEM.pdf) (geprüft am 16.6.2017).