



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48



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

**10. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

11. März 2019

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

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-3 65 68
Fax: +49 351 463-3 72 89

Titelbild:

Belastungsrahmen für die Prüfung von Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus
Görlitz (Foto: Oliver Mosig, s. Beitrag Mosig et al. in diesem Tagungsband)

Redaktion und Layout: Silke Scheerer
Korrekturen: Petra Kahle, Angela Heller
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel
Für die Inhalte der Beiträge sind die Autor*innen verantwortlich.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, März 2019

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau verfügbar (<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/das-institut/veranstaltungen/SEUB>).

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-583-4

Inhalt

Vorwort	7
Steffen Marx, Jürgen Grünberg, Gregor Schacht Sicherheitskonzept für Belastungsversuche	9
Mai Häßler Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen	23
Thilo Fröhlich, Veit Birtel, Dieter Lotze Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung	33
Oliver Mosig, Sabine Wellner, Jörg Rudolph Belastungsprüfung der Geschosdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz	45
Volker Wetzck, Claudia Pahlow Das Potenzial von Miniatur-Druckproben für die Werkstoffcharakterisierung von Stahlguss	59
Kerstin Speck, Fritz Vogdt, Manfred Curbach, Yuri Petryna Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton	71
Jens Heinrich, Reinhard Maurer Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken	83
Max Käding, Gregor Schacht, Guido Bolle, Steffen Marx Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrissskorrosion	97
Florian Schill, Milo Hirsch, Andreas Eichhorn Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern	109
Jörg Scheithauer, Chris Hobusch, Falk Steinigk, Torsten Hillig, Matthias Schramm UAV und BIM – neue Herausforderungen an die Bauüberwachung bei Infrastrukturmaßnahmen an Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn	123
Nico Steffens, Kay Degenhardt, Karsten Geißler Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring	135
Marc Gutermann, Werner Malgut, Carsten Böhme Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover	147
Oliver Fischer, Sebastian Gehrlein Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke ...	161

Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen

Mai Häßler¹

Kurzfassung. Die Bewertung der Tragfähigkeit von fachwerkartigen Eisen- und Stahlkonstruktionen hängt wesentlich von den vorhandenen Stabnormalkräften und den daraus resultierenden Spannungen ab. Eine Zustands- und Tragfähigkeitsbewertung der bestehenden Konstruktion ist insbesondere erforderlich, wenn aufgrund von Nutzungsänderungen bzw. Umbaumaßnahmen höhere Lasten auf das Tragwerk aufgebracht werden sollen oder sich Schäden an der Konstruktion bzw. dem Material zeigen. Für die Tragfähigkeitsbewertung von historischen Konstruktionen ist zur Identifikation des vorhandenen Normalkraft- bzw. Spannungszustands ein zerstörungsfreies und praktikables Verfahren erforderlich. Das hierfür neu entwickelte Verfahren basiert auf Schwingungsmessungen und der Finite-Elemente-Methode in Verbindung mit Optimierungsstrategien. Die Stabkräfte der im Fachwerk vorhandenen Zugglieder lassen sich mit Hilfe eines analytisch basierten Algorithmus unter Verwendung eines Vergleichs zwischen numerischen Simulationsberechnungen und experimentell ermittelten Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen am Gesamttragwerk sowie ausgewählten Einzelstäben berechnen. Für die getesteten Tragsysteme zeigte sich unter verschiedenen hohen Beanspruchungen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den im Versuch aufgebrachten und den mit Hilfe des entwickelten Verfahrens identifizierten Stabnormalkräften.

1 Einleitung

Eisen- und Stahlfachwerke finden in verschiedenen Konstruktionen Anwendung, z. B. für Dachbinder in Bahn- und Markthallen, Industriebauten oder als Fachwerkträger bei Brücken. Ein Beispiel für sich heute noch immer in Nutzung befindende Fachwerke sind die in den 1840er Jahren errichteten eisernen Dachtragwerke in der Eremitage in Sankt Petersburg (Bild 1). In Bezug auf die Vielfalt konstruktiver Prototypen und den Detailreichtum sind

¹ Dr.-Ing., Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin

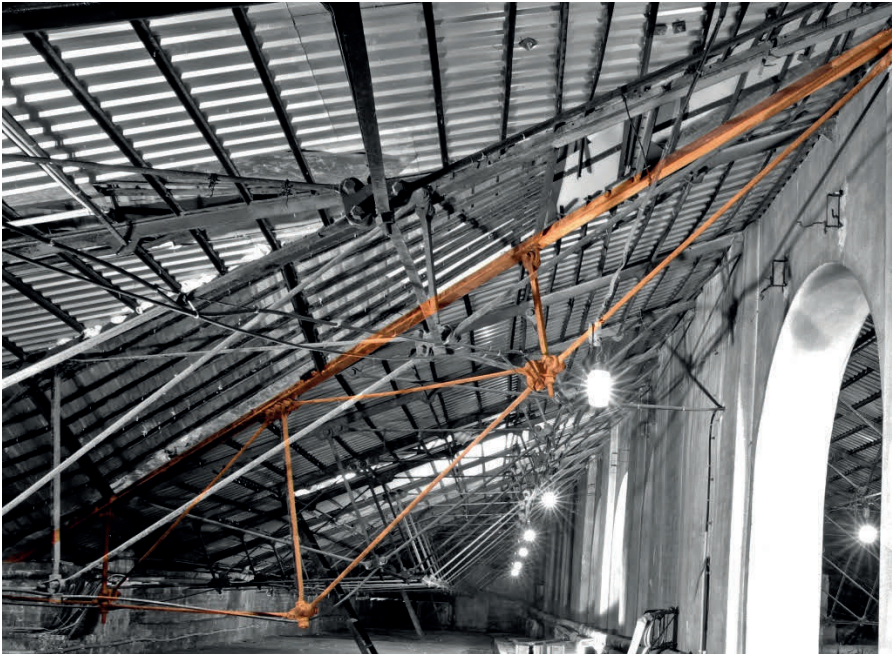


Bild 1 Eiserne Fachwerkkonstruktionen in den Dächern der Eremitage in Sankt Petersburg

diese Fachwerkkonstruktionen ein herausragendes Zeugnis für den frühen europäischen Stahlbau [1], [2].

Wenn aufgrund von Nutzungsänderungen bzw. Umbaumaßnahmen höhere Lasten auf das Tragwerk aufgebracht werden sollen oder sich Schäden an der Konstruktion bzw. dem Material zeigen, ist eine Zustands- und Tragfähigkeitsbewertung der bestehenden Konstruktion in der Regel erforderlich. Die Tragfähigkeit von fachwerkartigen Eisen- und Stahlkonstruktionen ist wesentlich von den vorhandenen Belastungen und den daraus resultierenden Spannungen abhängig. Liegen ausreichende Informationen hinsichtlich der äußeren Einwirkungen, der inneren Beanspruchung durch Vorspannelemente, der Geometrie, der Materialeigenschaften, der Auflagersituation sowie der Freiheitsgrade in den Knotenverbindungen vor, können die Stabnormalkräfte in der Fachwerkkonstruktion in Form einer statischen Berechnung ermittelt werden. Allerdings ist es in der Praxis oftmals schwierig, für bestehende Tragwerke, insbesondere bei historischen Fachwerkkonstruktionen, präzise Informationen für die genannten Parameter zu erhalten oder adäquate Annahmen zu treffen.

Der Beitrag beschreibt ein neu entwickeltes zerstörungsfreies Verfahren zur Identifikation des Spannungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken. Darüber hinaus

wurde bei der Entwicklung des Verfahrens die Fragestellung der Modellierung der Knotenpunkte in Bezug auf die Rotationsfedersteifigkeit untersucht. Ferner wurden verschiedene Strategien für den Kalibrierungsprozess des numerischen Modells analysiert. Dies beinhaltet ein Kriterium zur Zuordnung der Eigenschwingformen, die Definition von Zielfunktionen, die Durchführung von Sensitivitätsanalysen sowie die Auswahl und Festlegung von Kalibrierungsparametern. Aufbauend auf den numerischen Simulationen und experimentellen Untersuchungen wird ein Verfahren zur Bestimmung der Stabnormalkräfte sowie der Knotenrotationsfedersteifigkeit in fachwerkartigen Tragwerken vorgeschlagen.

Die im Beitrag vorgestellten Ergebnisse stellen einen Auszug aus der an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg in Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung von der Autorin verfassten Dissertation [3] dar.

2 Stand der Forschung

Die zerstörungsfreie inverse Identifizierung von Normalkräften in axial belasteten Strukturelementen wurde bereits in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten untersucht, [3]–[7]. Die Identifikationstechniken können nach statischen, statisch-dynamischen oder rein dynamischen Verfahren klassifiziert werden. Zusätzlich werden die Methoden in ihrer Anwendungsart auf die verschiedenen Ingenieurbauwerke, z. B. Stützen, Seile, Zuganker oder Fachwerke, unterschieden. Die Vorteile der dynamischen Messmethode liegen in der praktikablen Verfahrensweise, d. h. das Aufbringen von zusätzlichen Lasten auf die Konstruktion ist nicht erforderlich, sowie der hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit der schwingungsbasierten Messungen.

Die Normalkräfte und somit die in den Stäben vorhandenen axialen Spannungen bewirken eine Änderung der Struktursteifigkeit, wodurch die dynamischen Eigenschaften der Fachwerkstruktur verändert werden. Dieser Einfluss wurde im Fall eines Zuggliedes untersucht und eine Verschiebung des Frequenzspektrums festgestellt [4]. Der durch die axiale Kraft hervorgerufene Effekt zweiter Ordnung auf die transversale Steifigkeit eines Stabes wurde basierend auf den modalen Parametern zur inversen Identifikation der axialen Kräfte in den Strukturelementen verwendet [5], [6]. Während Bahra und Greening [5] die multiple Normalkraftidentifikation von Fachwerken unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode in Verbindung mit Modellkalibrierungsstrategien vorschlagen, wurde von Maes et al. [6] ein analytisch basierter Algorithmus zur Bestimmung der Stabkräfte in einer fachwerkartigen Konstruktion entwickelt. Beide Methoden reagieren jedoch empfindlich gegenüber den Startwerten für die Modellkalibrierung [5] oder Unsicherheiten bei den Eingangsparametern [6].

Bei der Analyse eines Einzelstabes als Teil einer Fachwerkstruktur wird ein Balkenmodell mit Translations- sowie Rotationsfedern an den Stabenden angenommen. Luong et al. [7] haben gezeigt, dass die Annahmen bezüglich der Rotationssteifigkeit in den Knotenpunkten erhebliche Auswirkungen auf das dynamische Verhalten einer fachwerkartigen Konstruktion haben. Sowohl das dynamische Verhalten der Fachwerkstruktur (global)

als auch das der Einzelstäbe (lokal) wird durch die Modellierung der Knotenverbindungen und die dafür angesetzte Rotationssteifigkeit beeinflusst. Um das dynamische Verhalten der Fachwerkkonstruktionen korrekt zu approximieren, muss daher im numerischen Modell die Rotationssteifigkeit der Knotenverbindungen als unbekannter Parameter berücksichtigt werden. In dem neu entwickelten Verfahren wurden die Knotenverbindungen im numerischen Modell als streuende Größen behandelt und als teilweise eingespannte (*semi-rigid*) Rotationsfedern modelliert. Aus praktischen Gründen wurde für die Rotationsfedersteifigkeit ein normierter Faktor γ_i eingeführt, Gleichung (1). Dieser kann einen Wert zwischen 0 (gelenkig) und 1 (biegesteif) annehmen. In Gl. (1) sind k_{r_i} die Rotationsfedersteifigkeit am i -ten Ende eines Einzelstabes, $E \cdot I$ der Biege Widerstand und L die Länge des Stabes.

$$\gamma_i = \frac{k_{r_i} \cdot L}{3 \cdot E \cdot I + k_{r_i} \cdot L} \quad (1)$$

3 Entwickelte Untersuchungsmethodik

Das entwickelte Verfahren basiert auf Schwingungsmessungen und der Finite-Elemente-Methode in Verbindung mit Optimierungsstrategien. Dabei werden entsprechende Optimierungsmethoden angewendet. Die Kalibrierung des numerischen Modells der Fachwerkkonstruktion erfolgt anhand experimentell bestimmter modaler Parameter, d. h. Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen. Im Ergebnis können die Normalkräfte und die sich daraus ergebenden Spannungen in den Fachwerkstäben identifiziert werden. Zusätzlich lassen sich mit dem Verfahren auch Informationen hinsichtlich der Rotationsfedersteifigkeit in den Knotenpunkten ableiten.

Für die Bestimmung der Stabnormalkräfte in fachwerkartigen Tragwerken und zur Abschätzung der Rotationsfedersteifigkeit in den Knotenverbindungen wird ein zweistufiges Modellkalibrierungsverfahren vorgeschlagen. Die Stabnormalkräfte können durch die erste Stufe der Modellkalibrierung mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt werden. Allerdings liefert diese erste Verfahrensstufe für die Rotationsfedersteifigkeiten lediglich Näherungswerte. Um die Genauigkeit zu verbessern, ist ein zweiter Modellkalibrierungsprozess erforderlich.

In der ersten Stufe der Modellkalibrierung werden als Validierungskriterium die experimentell ermittelten globalen Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen der fachwerkartigen Tragstrukturen verwendet. Ergänzend können die Stabnormalkräfte in ausgewählten Zuggliedern aus Einzelstabuntersuchungen als zusätzliche Informationen herangezogen werden. Die Stabkräfte der Zugglieder lassen sich mit Hilfe eines analytisch basierten Algorithmus [6] anhand der lokalen Eigenfrequenzen eines Stabes und fünf Amplituden der dazugehörigen Eigenschwingformen berechnen. Basierend auf den Ergebnissen der schwingungsbasierten Messungen wird die Kalibrierung zwischen den numerisch berechneten und den experimentell ermittelten modalen Eigenschaften durchgeführt. Die äußere Last auf die fachwerkartige Konstruktion und die Rotationsfedersteifigkeiten der Knotenverbindungen werden im numerischen Modell als Unbekannte angenommen. Die Bestimmung der unbekannt Parameter erfolgt in der ersten Stufe der Modellkalibrierung in

einem durch einen *genetischen Algorithmus* (GA) gesteuerten Optimierungsprozess, bei dem die erforderliche Zielfunktion $f_{obj,i}$ minimiert wird, s. Gl. (2). Der GA ist eine von der Natur inspirierte Optimierungsmethode, s. z. B. [8]. Die Vorteile des GA sind unter anderem die Unabhängigkeit der Ergebnisse von den Startwerten der Kalibrierungsparameter sowie die Möglichkeit zur Identifikation des globalen Minimums [3], [8]. In der Gleichung für die Zielfunktion der ersten Modellkalibrierstufe sind a , b und c die Wichtungsfaktoren für die einzelnen Summenterme. Vereinfachend können die Wichtungsfaktoren mit dem Wert 1 angenommen werden. Die Bezeichnungen f_i^{exp} , f_i^{num} , φ_i^{exp} und φ_i^{num} sind die i -te experimentell ermittelte oder numerisch berechnete Eigenfrequenz bzw. Eigenschwingform. Das *Modal Assurance Criterion* (MAC) beschreibt die Korrelation zwischen den experimentell ermittelten und numerisch berechneten Eigenformen. Ferner sind $nmodef$ und $nmode\varphi$ die Gesamtanzahl der zur Kalibrierung des numerischen Modells verwendeten Eigenfrequenzen bzw. Eigenschwingformen. Die Gesamtanzahl der ausgewählten Stäbe einer Fachwerkstruktur wird durch $nbar$ definiert. N_j^{num} ist die sich aus einer statischen Berechnung ergebende Normalkraft im j -ten Einzelstab. N_j^a ist die nach Maes et al. [6] mit Hilfe eines analytisch basierten Algorithmus bestimmte Normalkraft im j -ten Einzelstab. N_j^{ref} ist die berechnete Normalkraft aus dem Produkt der Querschnittfläche A_j und der Referenzspannung σ_j^{ref} des j -ten Einzelstabes. Die Referenzspannung wurde in dem entwickelten Verfahren mit einem Wert von 50 N/mm² angenommen.

$$f_{obj,i} = a \cdot \sum_{i=1}^{nmodef} \left| \frac{f_i^{num} - f_i^{exp}}{f_i^{exp}} \right| + b \cdot \sum_{i=1}^{nmode\varphi} \left| MAC(\varphi_i^{exp}, \varphi_i^{num}) - 1 \right| + c \cdot \sum_{j=1}^{nbar} \left| \frac{N_j^{num} - N_j^a}{N_j^{ref}} \right| \quad (2)$$

Basierend auf den Ergebnissen der identifizierten Stabnormalkräfte aus der ersten Stufe des Modellkalibrierungsprozesses kann dann in einer zweiten Stufe die genauere Bestimmung der Rotationsfedersteifigkeit in den Knotenverbindungen erfolgen. Hierzu werden ausschließlich die modalen Parameter der globalen Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen der fachwerkartigen Konstruktionen herangezogen, s. Gl. (3). Vereinfachend können die Wichtungsfaktoren d und e mit dem Wert 1 angenommen werden.

$$f_{obj,II} = d \cdot \sum_{i=1}^{nmodef} \left| \frac{f_i^{num} - f_i^{exp}}{f_i^{exp}} \right| + e \cdot \sum_{i=1}^{nmode\varphi} \left| MAC(\varphi_i^{exp}, \varphi_i^{num}) - 1 \right| \quad (3)$$

4 Verifizierung und Validierung der Untersuchungsmethode

Bei den im Labor untersuchten Konstruktionen handelt es sich um ein Einzelstabsystem, ein Zweistabsystem sowie ein aus fünf Stäben bestehendes Fachwerk [3]. Die Entwicklung vom Einzelstabsystem zum komplexen Fachwerksystem erfolgte durch schrittweises Hinzufügen von Einzelstäben sowie deren Verbindungen in den Knoten. Mit der Zunahme von Umfang und Komplexität des Tragwerks wird der Einfluss der Stabnormalkräfte auf das dynamische Verhalten der Konstruktion ebenfalls komplizierter. Grund hierfür ist das gleichzeitige Vorliegen von Druck- und Zugkräften, welche jeweils eine entgegengesetzte Wirkung auf die modalen Parameter besitzen. Dadurch kommt es bei einer Variation der

Belastungshöhe zu einer Veränderung der Eigenfrequenzen und einer vergleichsweise schwierigeren Zuordnung der jeweiligen Eigenschwingformen.

In diesem Beitrag wird ausschließlich auf die Untersuchung des aus fünf Stäben bestehenden Fachwerksystems eingegangen (s. Bild 2). Für die einzelnen aus Stahl bestehenden Fachwerkstäbe wurden eine Dichte von 7850 kg/m^3 und ein Elastizitätsmodul von 205000 N/mm^2 angesetzt. Der Wert des Elastizitätsmoduls wurde anhand von aus den Zugstäben entnommenen Proben mittels Zugversuchen bestimmt.

Die untersuchte Fachwerkkonstruktion besitzt in horizontaler Richtung ein Festlager (Auflager I) und ein Rollenlager (Auflager II). Die beiden Auflager sind in vertikaler Richtung unverschieblich. Die Verbindung der Stäbe in den Knoten wurde mit Schrauben realisiert, so dass sich an den Stabenden eine freie Rotation in Fachwerkebene einstellen kann. Durch einen vertikal am Knoten III angeordneten Verbindungsstab konnten mittels eines Hydraulikzylinders unterschiedlich hohe Belastungen auf das Fachwerksystem aufgebracht werden.

Zusätzlich zu der durch eine Kraftmessdose gemessenen äußeren Belastung erfolgte an den Zugstäben 1 bis 3 mittels Dehnmessstreifen eine Ermittlung der Stabspannungen. Diese Informationen wurden für die Verifizierung des entwickelten Verfahrens verwendet. Durch Erhöhung der mechanischen Last von ca. $5,7 \text{ kN}$ auf 29 kN ergaben sich für den Stab 1 Zugspannungen von ca. 34 N/mm^2 bis 156 N/mm^2 .

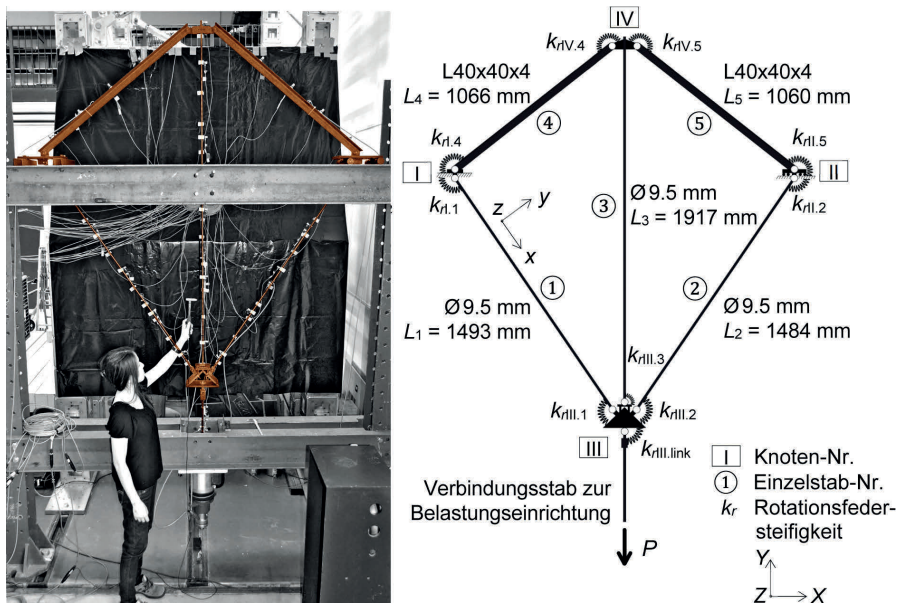


Bild 2 Versuchsaufbau des untersuchten Fachwerksystems

Die Identifikation der Eigenfrequenzen und Eigenformen erfolgte durch dynamische Schwingungsversuche mit Hammeranregung bei einer Abtastfrequenz von 2048 Hz. An jedem Stab befanden sich jeweils fünf Beschleunigungssensoren, insgesamt wurden 25 Beschleunigungssensoren am Fachwerk angebracht. Zur Ableitung der modalen Parameter wurde die sogenannte *Stochastic Subspace Identification* verwendet [9]. Für das Modellkalibrierungsverfahren wurden vier bis sechs experimentell identifizierte Eigenschwingformen des Fachwerks (global) herangezogen (Bild 3). In Tabelle 1 sind die mit dem entwickelten Verfahren identifizierten äußeren Lasten und Normalkräfte des Stabes 1 den experimentell gemessenen Werten gegenübergestellt. Für das getestete Fachwerk zeigte sich unter verschiedenen hohen Beanspruchungen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den im Versuch aufgebrachten und den mit Hilfe des entwickelten Verfahrens identifizierten Stabnormalkräften.

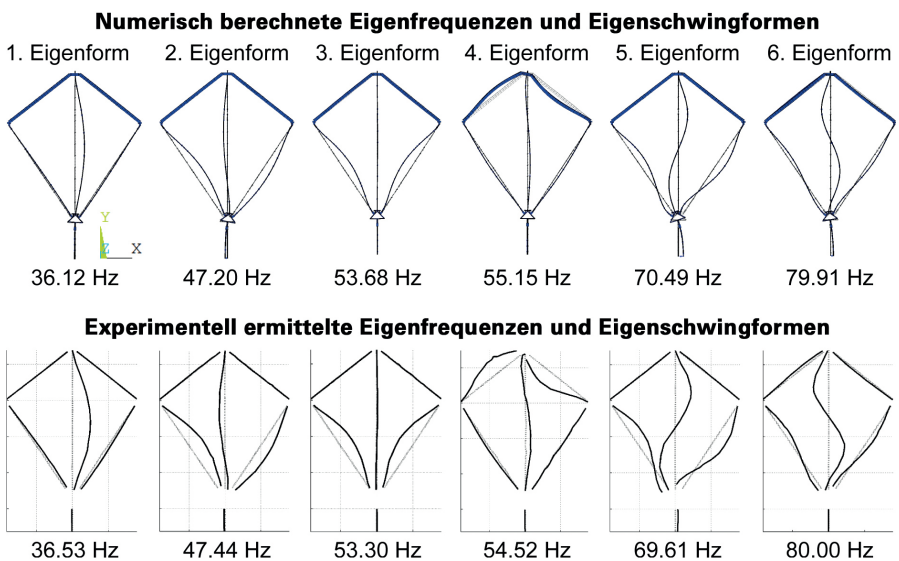


Bild 3 Vergleich von sechs numerisch berechneten und experimentell ermittelten Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen für eine Belastung von 29,14 kN (7. Belastungsschritt)

Des Weiteren sind in Tabelle 2 die numerisch bestimmten Rotationsfedersteifigkeiten k_r angegeben. Da das untersuchte Fachwerk nahezu symmetrisch ist, wurden bei der Modellkalibrierung für die jeweils gegenüberliegenden Knoten die gleichen Rotationsfedersteifigkeiten angenommen.

Es hat sich gezeigt, dass mit zunehmender Beanspruchungshöhe im Allgemeinen die Rotationssteifigkeit in den Knotenpunkten der Zugstäbe zunimmt. Bei einer dynamischen Schwingungsanalyse des untersuchten Fachwerks kann vereinfachend von einer annähernd biegesteifen Verbindung der Zugstäbe ausgegangen werden.

Tabelle 1 Vergleich der experimentell gemessenen und mit dem entwickelten Verfahren identifizierten äußeren Lasten und Normalkräfte für den Stab 1 des untersuchten Fachwerksystems^{*)}

Belastungsschritt	P^{exp}	P^{id}	Δ	Δ	N_1^{exp}	σ_1^{exp}	N_1^{id}	σ_1^{id}	Δ	Δ
		[kN]		[%]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[%]
1	5,65	5,50	-0,15	-2,65	2,38	33,63	2,20	31,04	-0,18	-7,56
2	7,66	7,32	-0,34	-4,44	3,15	44,47	2,91	41,11	-0,24	-7,62
3	12,00	11,28	-0,72	-6,00	4,65	65,56	4,46	62,92	-0,19	-4,09
4	15,76	15,27	-0,49	-3,11	6,06	85,42	6,02	84,94	-0,04	-0,66
5	19,62	20,21	0,59	3,01	7,58	106,87	7,96	112,24	0,38	5,01
6	24,75	24,17	-0,58	-2,34	9,34	131,83	9,50	134,07	0,16	1,71
7	29,14	29,68	0,54	1,85	11,09	156,42	11,65	164,40	0,56	5,05

^{*)} zur Definition der Variablen s. Abschnitt 3 des Aufsatzes

Tabelle 2 Ergebnisse der numerisch bestimmten Rotationsfedersteifigkeiten k_r , sowie der entsprechenden normierten Faktoren y des untersuchten Fachwerksystems

Belastungsschritt	$k_{rl.1}^{id}$	$y_{krl.1}^{id}$	$k_{rIII.1}^{id}$	$y_{krIII.1}^{id}$	$k_{rIII.3}^{id}$	$y_{krIII.3}^{id}$	$k_{rIII.link}^{id}$	$y_{krIII.link}^{id}$	$k_{rIV.4}^{id}$	$y_{krIV.4}^{id}$
	[kNm/rad]	[-]	[kNm/rad]	[-]	[kNm/rad]	[-]	[kNm/rad]	[-]	[kNm/rad]	[-]
1	0,92	0,83	3,69	0,95	2,22	0,95	132,75	0,97	22,20	0,46
2	1,99	0,92	3,40	0,95	4,94	0,97	211,35	0,99	21,49	0,45
3	2,14	0,93	4,63	0,96	8,26	0,99	110,22	0,99	28,94	0,52
4	4,21	0,96	2,72	0,94	8,22	0,98	133,33	0,97	22,04	0,45
5	3,41	0,95	1,38	0,89	7,18	0,98	220,45	0,99	25,42	0,49
6	11,42	0,98	3,28	0,95	9,84	0,99	110,22	0,99	28,09	0,51
7	16,31	0,99	12,49	0,99	1,51	0,92	151,82	0,98	33,47	0,56

5 Zusammenfassung

Das entwickelte Verfahren wurde sowohl mittels numerischer Untersuchungen als auch durch Laborversuche erprobt und validiert. Die Ergebnisse der getesteten Tragsysteme weisen unabhängig von der Höhe der Beanspruchung eine gute Übereinstimmung zwischen den im Versuch vorhandenen und den mit Hilfe des entwickelten Verfahrens identifizierten Stabnormalkräften auf. In Bezug auf die Rotationsfedersteifigkeit in den Knotenpunkten konnte ebenfalls mit Hilfe der numerischen Berechnung eine Abschätzung des Einspanngrades vorgenommen werden.

Das Verfahren eignet sich besonders für Eisen- und Stahlfachwerke mit vergleichsweise filigranen Stäben und überwiegender Normalkraftbeanspruchung. Bei Untersuchung des Gesamtsystems kann in der Regel der Beanspruchungszustand, d. h. Normalkräfte, aller Einzelstäbe bestimmt werden. Des Weiteren kann das kalibrierte numerische Modell des Gesamtsystems für die Untersuchung verschiedener Belastungsszenarien verwendet werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine detaillierte numerische Modellierung des Tragwerks. Zudem weist das Verfahren gegenüber der Wahl der Startwerte für die Kalibrierungsparameter sowie streuenden Eingangsparameter eine gute Robustheit auf.

In Bezug auf die Schwingungsuntersuchung eines Einzelstabes sind mindestens fünf Sensoren erforderlich. Dabei ist auf eine sinnvolle Sensoranordnung sowie einen gewissen Abstand der Sensoren zu den jeweiligen Stabenden zu achten. Für die In-situ-Anwendung des entwickelten Verfahrens werden insbesondere im Hinblick auf historische fachwerkartige Tragwerke weiterführende Untersuchungen empfohlen. Eine Leitlinie für die Erstellung von Messkonzepten sowie Hilfestellungen bei der Entwicklung von Bemessungsstrategien für die In-situ-Untersuchung und Zustandsbeurteilung von fachwerkartigen Eisen- und Stahlkonstruktionen sind in [3] angegeben.

Literatur

- [1] Lorenz, W.: Modern Museums in World Heritage Monuments – Structural challenges, structural solutions (in Russisch). In: The State Hermitage Publ. (Hrsg.): Proc. of the Int. Conf. Museums of the 21st century – restoration, reconstruction, renovation, 20.–22.10.2008 in Sankt Petersburg (Russland), 2010, S. 28–36
- [2] Lorenz, W.; Heres, B.: Archäologie des Konstruierens – Untersuchungen zur Entstehung von Konstruktionsprachen an den Eisentragwerken der Eremitage St. Petersburg. Forum der Forschung 10 (2006)19, S. 163–170
- [3] Luong, H. T. M.: Identification of the State of Stress in Iron and Steel Truss Structures by Vibration-based Experimental Investigations. Diss., Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2018
- [4] Luong, H. T. M.: Experimentelle und numerische Untersuchung der Normalkraft in historischen Stahl-Zugankern mit Hilfe von dynamischen Methoden. In: BuFAS e. V. (Hrsg.): Forum Altbausanierung 7 – Feuchte, Wärme, Schimmelpilz – Tagungsband der 23. Hanseatischen Sanierungstage, 1.–3.11.2012 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom, Fraunhofer IRB Verlag | Berlin · Wien · Zürich: Beuth, 2012, S. 113–129
- [5] Bahra, A. S.; Greening, P. D.: Identifying multiple axial load patterns using measured vibration data. Journal of Sound and Vibration 330 (2011) 15, S. 3591–3605
- [6] Maes, K.; Peeters J.; Reynders, E.; Lombaert, G.; De Roeck, G.: Identification of axial forces in beam members by local vibration measurements. Journal of Sound and Vibration 332 (2013) 21, S. 5417–5432
- [7] Luong, H. T. M.; Zabel, V.; Lorenz, W.; Rohrmann, R. G.: Vibration-based Model Updating and Identification of Multiple Axial Forces in Truss Structures. Procedia Engineering 188 (2017), S. 385–392

- [8] Ribeiro, D.; Calçada, R.; Delgado, R.; Brehm, M.; Zabel, V.: Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. *Engineering Structures* 40 (2012) July, S. 413–435
- [9] Peeters, B.; De Roeck, G.: Stochastic system identification for operational modal analysis: A review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 123 (2001) 4, S. 659–667

Anmerkung: Bei den Quellen [3], [4], [7] handelt es sich um frühere Veröffentlichungen der Autorin.

Bildnachweise

Bild 1 Bernhard Heres; bearbeitet von Mai Häßler (bereits in [3] publiziert)
Bilder 2, 3 Mai Häßler

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 48

Das 10. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ fand am 11. März 2019 an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

Das Symposium wurde mit einem Vortrag über Analogieübertragungen und Sicherheitsaspekte bei experimentellen Bauwerksuntersuchungen eröffnet. Zum Thema Messtechnik wurden in diesem Jahr vor allem faseroptische Systeme und deren Anwendung sowie die Möglichkeiten digitaler bildgebender Verfahren diskutiert. Zwei Vortragende stellten Messmethoden vor, die auf Schwingungsanregungen beruhen, einmal zur Bestimmung von Stabkräften und einmal für die Prüfung von Befestigungen. Als Fortsetzung eines Beitrags zum 9. SEUB wurde das Potential von Miniaturproben zur Kennwertermittlung dargelegt.

Berichte über Projekte zur Thematik Bauwerksbeprobung und Monitoring rundeten das Vortragsprogramm ab. Neben einem Beispiel aus dem Hochbau nahmen beim 10. SEUB vor allem Projekte aus dem Brückenbau eine dominierende Rolle ein. Die Spanne reichte von der Anwendung faseroptischer Messmethoden bei 1:1-Versuchen über die realitätsnahe Bestimmung von Ziellastniveaus bis zu In-situ-Tests an Brückenbauwerken.