



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

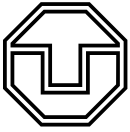
**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

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](http://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

## Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke<sup>1</sup>

Gregor Schacht<sup>2</sup>, Jens Piehler<sup>3</sup>, Erik Meichsner<sup>4</sup>, Steffen Marx<sup>5</sup>

**Zusammenfassung:** Die Eisenbahn-Gewölbebrücke über die Aller bei Verden wurde im Oktober 2015 nach über 150 Jahren außer Betrieb genommen und im Sommer 2016 endgültig abgebrochen. Dadurch ergab sich die Chance, das Tragverhalten mithilfe einer Probelastung genauer zu untersuchen. Ein Projektteam unter Führung des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover führte im März und im Juni 2016 zwei Belastungsversuche durch und konnte das Tragverhalten des Gewölbes weit oberhalb des Gebrauchslastniveaus unter einer maximalen Belastung von ca. 560 t (!) untersuchen.

**Summary: Load tests on a historic railway vault bridge.** After 150 years in use the historic masonry arch bridge over the river Aller near Verden was taken out of service in October 2015 and was demolished in summer 2016. This was the chance for an experimental investigation of the load-deformation behaviour by load testing. A project team under the leadership of the Institute of Concrete Construction of the Leibniz University Hannover has carried out two load test with a maximum load of 560 t (!) in March and June 2016.

### 1 Einführung

„Ich will keine Eisenbahn in meinem Lande, ich will nicht, dass jeder Schuster und Schneider so schnell reisen kann wie ich.“

So wird König Ernst-August von Hannover in den 1830er Jahren zitiert [2]. Auch in der niedersächsischen Bevölkerung gab es zahlreiche Bedenken gegen die Eisenbahn und es wurden sogar gesundheitliche Schäden durch die hohe Reisegeschwindigkeit vermutet. Diese Gerüchte der Kutschenlenker und Pferdefuhrunternehmer zerstreuten sich aber schnell und so war auch Ernst-August bald ein glühender Verfechter der Eisenbahn. Nicht ganz klar ist, ob er 1843 bereits selbst von den Vorzügen des neuen Verkehrsmittels überzeugt war oder ob er sich schließlich dem Druck des mächtigen Nachbarn Preußen beugen musste, der eine Eisenbahnverbindung zwischen Berlin und den gewerbereichen Provinzen Rheinland und Westfalen über Hannover durchsetzte [3]. Allerdings entstehen im Königreich Hannover ab diesem Zeitpunkt in wenigen Jahren mehrere Eisenbahnlinien, wie z. B. die Hannover-Braunschweigische Bahn, die Lehrte-Harburger Bahn, die Lehrte-Hildesheimer Bahn, die Wunstorfer-Bremer Bahn u. v. m.

---

1 Teile dieses Beitrages wurden erstmals in der Zeitschrift Bautechnik [1] veröffentlicht. Die Verwendung von Teilen des Beitrages ist mit der Redaktion der Zeitschrift abgestimmt und genehmigt.

2 Dr.-Ing., Marx Krontal GmbH, Hannover

3 M.Sc., Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

4 Dipl.-Ing. (FH), Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar GmbH

5 Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

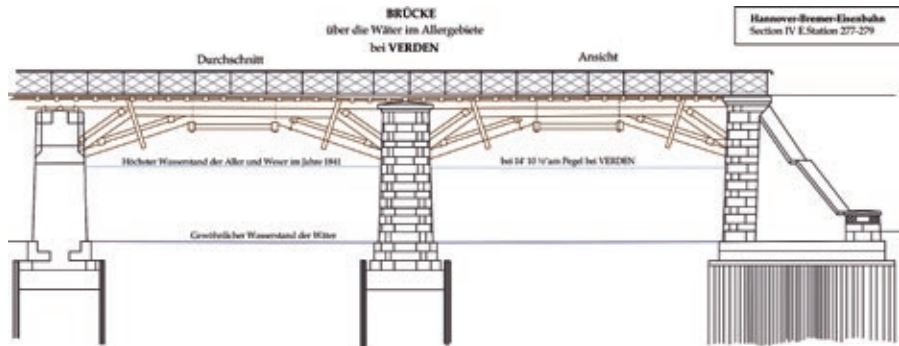


Bild 1: Ursprünglicher hölzerner Sprengwerküberbau zwischen gemauerten Pfeilern  
Zeichnung: DB Archiv Hannover

Mit den Planungen für eine Verbindung zwischen Hannover und Bremen beauftragte die Königliche Landesregierung in Hannover den Ingenieur-Oberstleutnant Victor Lebrecht Protz bereits 1835, doch endeten die vierjährigen Verhandlungen zwischen beiden Regierungen erst 1845, so dass die eingleisige Strecke erst am 12. Dezember 1847 eröffnet werden konnte [4]. Wichtige Bauwerke auf dieser Strecke waren die Brücken über die Aller und die Wätern bei Verden. Mit 23 Wölbungen je 14 Meter lichte Weite und einer Gesamtlänge von 393 Metern war die Allerbrücke die längste Brücke im Königreich Hannover. Die schnelle Umsetzung der Strecke und die großen Anfahrtswege für Natursteine waren die Gründe dafür, dass die Brücke 1843 zunächst als doppeltes hölzernes Sprengwerk ausgeführt wurde (Bild 1). Die Pfeiler waren bereits massiv, da hölzerne Gründungen in den Flutgebieten vollkommen ungeeignet waren [4].

Die Zunahme der Züge und Lasten sowie die schlechten Erfahrungen mit der Dauerhaftigkeit der hölzernen Überbauten führten 1862 zu einem Ersatz durch robustere und dauerhaftere Gewölbe und die Ergänzung einer parallelen Gewölbebrücke für ein zweites Gleis [4].

Die Gestalt behielt die Allerbrücke bis ins Frühjahr 1945, als die deutsche Wehrmacht die Brücke auf dem Rückzug sprengte. Alliierte Pioniere bauten aber zwischen Mai und Juni 1945 bereits eine Stahlbehelfsbrücke ein, um ihren Truppentransport in den Süden zu organisieren. In den 1950er Jahren wurde eine dauerhaftere Stahlbrücke zur Überquerung der Aller eingebaut, die Gewölbereihen in den Flutflächen blieben aber in ihrer ursprünglichen Form erhalten (Bild 2).

Trotz der robusten Konstruktion der Gewölbebrücke verschlechterte sich der Zustand des Tragwerkes mit fortschreitender Lebensdauer kontinuierlich. Aus den Ergebnissen der Bauwerksprüfungen und Inspektionen lässt sich ableiten, dass eine Veränderung der Standsicherheit des Bauwerkes bei gleich bleibender Belastung im Wesentlichen über zeitlich abhängige Minderungen der tragenden Querschnitte erfolgte. Diese zeigten sich in Form von Rissen, Hohllagen und Abplatzungen an den Oberflächen sowie durch Risse, Schalenbildung und Inhomogenitäten im tieferen Mauerwerksgefüge. Diese Entwicklung erreichte bereits in den

1990er Jahren einen besorgniserregenden Zustand, so dass umfangreichere Untersuchungen des Tragwerks durchgeführt wurden.

Detailliertere Betrachtungen zur Beurteilung der Tragsicherheit des Bauwerkes erfolgten durch die Deutsche Bahn AG im Jahr 1996 anhand eines Belastungsversuches und in den Jahren 2001/2002 durch materialtechnisch-konstruktive Untersuchungen und Berechnungen. Diese ergaben, dass das vorhandene Mauerwerk eine zu geringe Festigkeit besaß, um die Standsicherheit nachzuweisen. Bereits Anfang 2002 stand die Entscheidung für einen Ersatzneubau fest.

In den zurückliegenden Jahren wurden verschiedene Sicherungs- und Verstärkungsmaßnahmen ausgeführt. Die Maßnahmen erfolgten schrittweise entsprechend des aktuellen Bedarfs [5]. Aufgrund von horizontalen Verformungen der Stirnwände in Brückenquerrichtung erfolgte eine Klammerung ausgewählter Öffnungen mit ausbetonierten Spundwandprofilen durch Gewi-Anker. Auch wurde der Ausbruch von Mauerwerk durch zahlreiche Schichten von Spritzbetonverstärkungen verhindert. Durch Feuchtigkeitsschäden wurden diese Betonschichten aber auch immer wieder abgesprengt. Schließlich wurden 2005 mit dem Ziel der Verdichtung des Mauerwerksgefüges Injektionsarbeiten ausgeführt. Die Packer für die Verdämmung wurden in einem flächigen regelmäßigen Raster auf allen Gewölbeunterseiten gesetzt. Durch diese vollflächigen Injektionen wurde schließlich auch die letzte funktionierende Entwässerung des Bauwerkes verpresst, wodurch das Wasser nicht mehr abfließen konnte und das Mauerwerk konstant durchfeuchtet blieb. Der Schädigungsfortschritt war nicht mehr aufzuhalten [5]. Der weitere Fortschritt der Entwicklung bis hin zum Ersatzneubau ist in [6] und [7] dokumentiert.



Bild 2: Zustand der Allerbrücke vor dem Ersatzneubau

Foto: Erich Schwinge



Am 16.10.2015 ging die Gewölbebrücke nach über 150 Jahren außer Betrieb. Der Abbruch war für Mitte 2016 geplant, so dass sich die einmalige Chance ergab, das Bauwerk experimentell zu untersuchen und wertvolle Informationen über das Tragverhalten von Gewölbebrücken oberhalb des Gebrauchslastniveaus zu erhalten. Der Belastungsversuch war ein Kooperationsprojekt von verschiedenen Partnern aus Forschung und Praxis [1].

## 2 Versuchsvorbereitung

### 2.1 Zielstellung und Beschreibung des Tragwerks

Die rechnerische Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bogenbrücken ist heute in vielen Fällen nicht zufriedenstellend möglich. Auf dem Lastniveau des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (GZT) fehlt es an Erfahrungen über das reale (nichtlineare) Bauwerksverhalten. Da die Allerbrücke nach den Versuchen planmäßig abgebrochen werden sollte, ergab sich die Möglichkeit, Versuche im Grenzbereich der Tragfähigkeit bei verschiedenen Rückbauzuständen durchzuführen und wertvolle Informationen über das Last-Verformungs-Verhalten zu gewinnen. Die Messdaten können die Grundlage für eine Verifikation und Verbesserung der Rechenmodelle bilden. Neben dem reinen Bogentragverhalten konnten auch die Einflüsse der Stirnwand, der Abdichtungsschutzschicht sowie der Durchlaufwirkung der Bogenreihe auf das Tragverhalten untersucht werden.

Die Vorlandbrücken der alten Allerbrücke bestanden aus aneinandergereihten kreisförmigen Bögen aus Ziegelmauerwerk mit einer lichten Weite von jeweils ca. 14 m und einem Stich von nur ca. 2,0 m (Bild 3). Die Bogenreihungen waren durch massive Gruppenpfeiler von der Hauptbrücke mit stählernem Überbau getrennt. Auf der Nordseite (Verdener Seite) waren sechs und auf der Südseite sieben Bögen vorhanden. Die Breite der Bögen betrug 8,0 m, wobei diese parallel zur Bauwerksachse mittig durch eine Pressfuge getrennt waren. Die Bogendicke betrug im Stich 1,03 m und erhöhte sich im Kämpferbereich auf 1,27 m. Die Überschüttung über den Bögen, welche fast ausschließlich aus Gleisschotter bestand, besaß eine Mächtigkeit zwischen etwa 0,70 m und 1,50 m und war seitlich durch Stirnwände aus Mauerwerk begrenzt. Die Dicke der Stirnwände betrug zwischen 62 cm und 93 cm. Im Bereich der Pfeiler waren die Bogenzwickel ausbetoniert. Dieser Füllbeton besaß eine maximale Dicke von ca. 1,50 m.

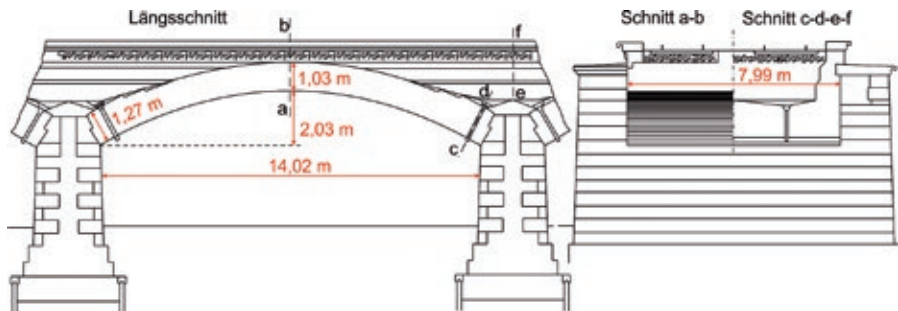


Bild 3: Darstellung des Gewölbes in Längs- und Querschnitt

Grafik: Gregor Schacht

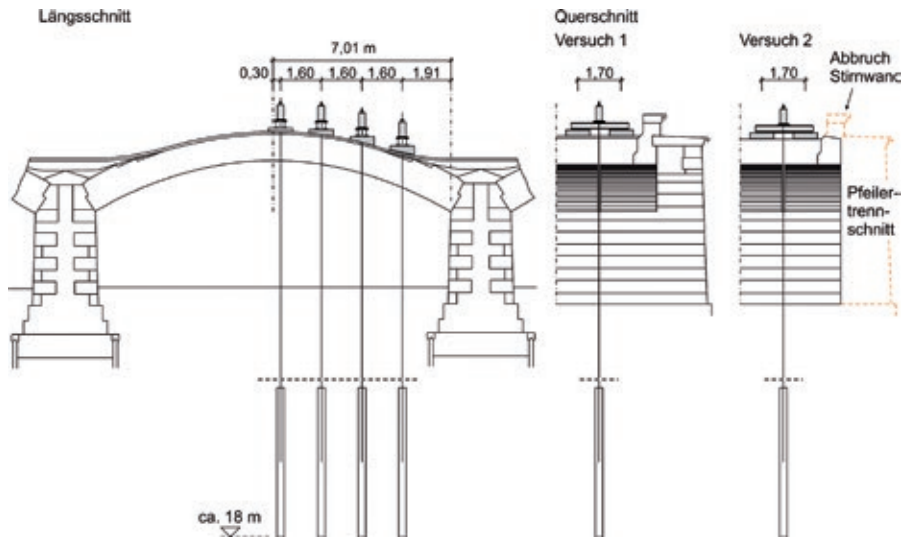


Bild 4: Darstellung der Belastungsanordnung und Verankerung im Boden

Grafik: Gregor Schacht

## 2.2 Versuchsplanung

Zur Vorbereitung der Versuche wurden durch die HTWK Leipzig umfangreiche numerische Untersuchungen durchgeführt, um eine zuverlässige Aussage über die kritischste Laststellung und -größe sowie das Verformungsverhalten der Bogenreihe und somit die im Versuch zu überwachenden Größen bestimmen zu können [8, 9]. Die numerischen Voruntersuchungen dienten auch der Abschätzung sicherheitsrelevanter Messgrößen für die Versuchsdurchführung. Die Gebrauchslast ergibt sich aus dem Ansatz des Lastmodells LM71 mit vier Achsen à 250 kN zu 1,0 MN. Erwartungsgemäß stellten sich die kritischsten Beanspruchungszustände unter halbseitiger Belastung an der Bogenunterseite direkt unter der Last und an den Kämpfern ein. Die numerischen Simulationen zeigten auch, dass mit ca. 5 MN eine ca. fünffache Gebrauchslast aufgebracht werden muss, um im Versuch erste nichtlineare Verformungen erreichen zu können. Ausgehend von diesen rechnerischen Voruntersuchungen wurde die im Versuch aufzubringende Belastung auf ca. 5,6 MN (570 t) festgelegt. Die Last wurde stufenweise in 1-MN-Schritten gesteigert, wobei nach jeder Laststufe eine Entlastung auf ein Grundlastniveau von 100 kN erfolgte. Jede Laststufe wurde zudem zweimal angefahren, um beginnende nichtlineare Verformungen sowie eingetragene Bauwerksschädigungen frühzeitig detektieren zu können [10].

Die Last wurde hydraulisch mithilfe von vier 2-MN-Zylindern aufgebracht und die Lasteinleitung entsprach mit acht Lasteinleitungspunkten dem Bemessungslastbild LM71. Die hydraulische Lastaufbringung erforderte eine Rückverankerung der Kräfte unterhalb des Bogens, für die verschiedene Lösungen diskutiert wurden. Schlussendlich erfolgte die

Rückverankerung der Kräfte über Mikropfähle in Gleisachse. Die Gewindestangen (GEWI) der Mikropfähle wurden verlängert und durch 150 mm weite Bohrlöcher durch das Brückengewölbe geführt (Bild 4). Die vier Hydraulikzylinder auf der Brücke wurden hydraulisch gekoppelt von einer elektrischen Pumpe gesteuert und die Kräfte an jedem Zylinder durch Kraftmessdosen erfasst.

### 2.3 Messkonzept

Die numerischen Voruntersuchungen zeigten, dass unter Lasten zwischen 500 und 600 t nichtlineare und irreversible Verformungen zu erwarten waren, die es galt, möglichst frühzeitig messtechnisch zu erfassen. Dazu wurde eine große Anzahl verschiedenster Messtechniken zur Aufnahme lokaler und globaler Verformungen eingesetzt (Bild 5). Des Weiteren sollten im Rahmen des Projekts verschiedene geodätische Messverfahren zur Erfassung der globalen Verformung während der Belastung miteinander verglichen werden.

Folgende Messziele wurden messtechnisch überwacht:

- Durchbiegungen in Längs- und Querrichtung,
- Dehnungen an der Gewölbeunterseite in Längs- und Querrichtung,
- Neigung der Gewölbepfeiler,
- fotogrammetrische Erfassung der Rissentwicklung an der Gewölbeunterseite und den Stirnseiten,
- Dehnungsverteilung im Kämpfer und Pfeiler und
- 3-D-Verformungserfassung mit Laserscanner, Lasertracker, Fotogrammetrie und Radar.

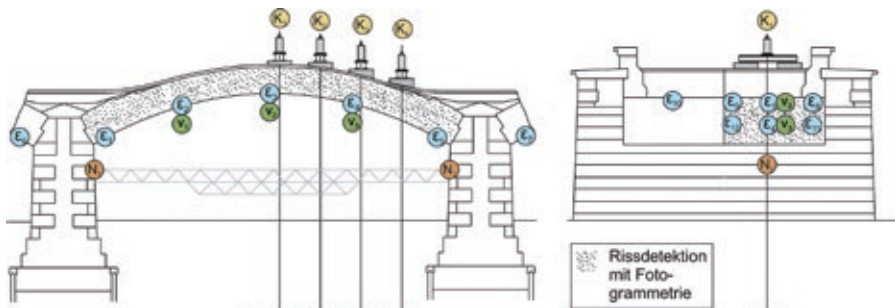


Bild 5: Übersicht der erfassten Messgrößen für die Beurteilung des globalen Verformungsverhaltens  
Grafik: Gregor Schacht

### 3 Durchführung der Versuche

Der erste Versuch fand im März 2016 statt. Der Oberbau (Schienen, Schwellen, Schotter) war bereits größtenteils rückgebaut, so dass die Lasteinleitung direkt auf den Betonplatten der Abdichtungsschutzschicht aufgebracht werden konnte (Bild 6).



Bild 6: Blick auf den Versuchsaufbau beim 1. Versuch

Foto: Stephanie A. Franck

Die Belastung wurde wie geplant in sechs Laststufen mit jeweils zwei Wiederholungen bis zur maximalen Belastung von 560 t gesteigert. Die gleichzeitig erfassten Verformungsmesswerte (Bild 7) wurden online auf einem PC ausgewertet und so das Tragverhalten hinsichtlich einer beginnenden Schädigung beurteilt. Die Versuchsziellast von 5,6 MN konnte sicher aufgebracht werden.

Der zweite Versuch wurde im Juni 2016 durchgeführt. Vor diesem Versuch wurden die Abdichtungsschicht zusammen mit den Betonplatten sowie Teile der Stirnwand im Bereich des zu untersuchenden Bogens entfernt. Auch wurde der vorgemauerte Pfeilerquerschnitt durch einen Trennschnitt abgetrennt. Dies sollte eine messtechnische Erfassung des Lastabtrags durch den inneren und äußeren Pfeilerquerschnitt ermöglichen. Die Belastungseinrichtung musste für den zweiten Versuch neu aufgebaut werden und stand direkt auf der Gewölbeoberseite bzw. dem Zwickelbeton. Als Absturzsicherung wurde für den Versuch ein Holzgeländer auf dem Bogen angebracht.

Der Zustand der Brücke zum zweiten Versuch ist in Bild 8 dargestellt.

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 Tragverhalten Gewölbereihe

Im ersten Versuch mit Abdichtungsschicht und Stirnwand zeigte der Bogen ab der Laststufe 4,7 MN leichte plastische Verformungen in den Dehnungs- und Durchbiegungsmessungen, was sich in den Lastwiederholungsphasen besonders deutlich zeigte. Unter maximaler Last



Bild 7: Blick auf die eingesetzte Messtechnik beim 1. Versuch Foto: Stephanie A. Franck



Bild 8: Blick auf den Versuchsaufbau beim 2. Versuch Foto: Jens Piehler

von 5,6 MN stellte sich erst nach einem längeren überproportionalen Verformungszuwachs Messwertkonstanz ein. Dies war ein eindeutiges Anzeichen für signifikante und bleibende Bauwerksverformungen, die eine Schädigung des Bauwerks bedeuteten. Im anschließenden Dauerstandversuch bei doppelter Gebrauchslast (2 MN) verhielt sich der Bogen wieder vollständig linear-elastisch.

Der Einfluss der Durchlaufwirkung der Bogenreihe auf das Verformungsverhalten konnte in den Versuchen sehr deutlich erkannt werden (Bild 9). Die gemessenen Vertikalverformungen in den benachbarten Bögen zeigen in jeder Laststufe deutliche Hebungen.

Im Bereich der Lasteinleitung konnten an der Gewölbeunterseite mithilfe der 2-D-Fotogrammetrie Risse in den Lagerfugen nachgewiesen werden [11, 12]. Die Risse öffneten sich ab einer Last von ca. 3,8 MN und schlossen sich wieder bei Entlastung. In den Verformungsmessungen wurden plastische Bauwerksverformungen festgestellt, welche vermutlich hauptsächlich auf plastische Druckdehnungen zurückzuführen sind.

In beiden Versuchen stellten sich im belasteten Bogen, trotz der halbseitigen Belastung, ausschließlich positive Durchbiegungen ein. Ein für halbseitige Belastung theoretisches Durch-

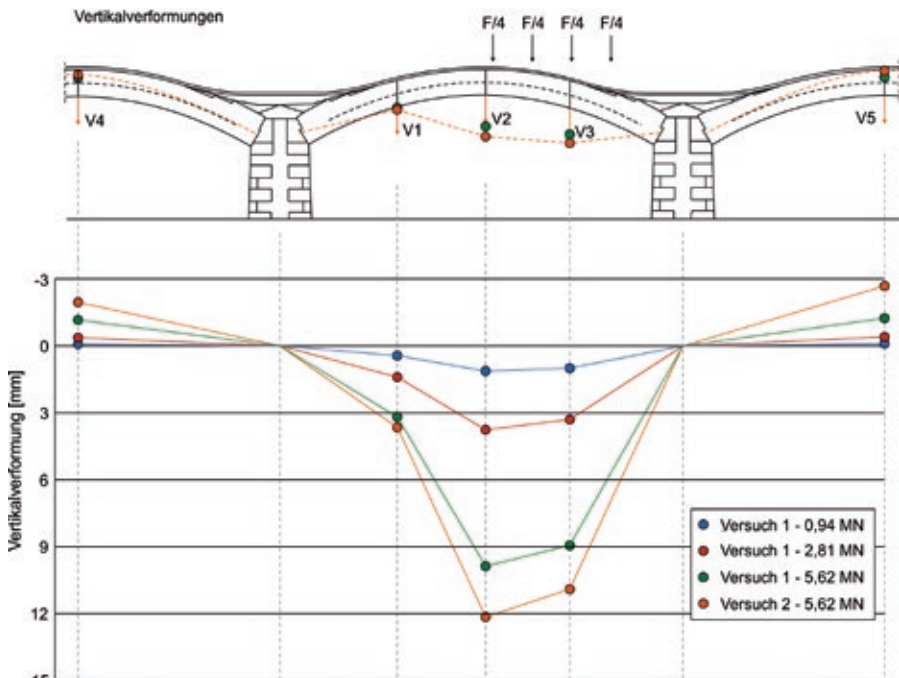


Bild 9: Vertikalverformungen zu den verschiedenen Belastungszuständen

Grafik: Gregor Schacht

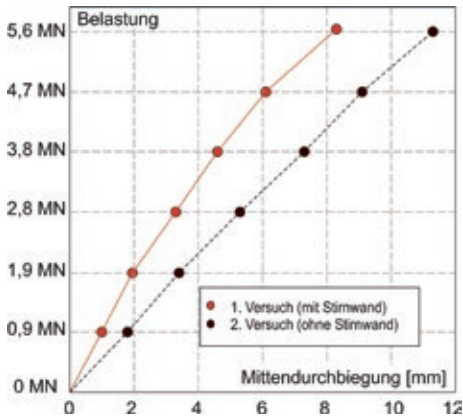


Bild 10: Vergleich der Last-Verformungs-Kurven für beide Versuche  
Grafik: Gregor Schacht

schlagen der Verformungsfigur und eine damit verbundene kinematische Kette konnten nicht beobachtet werden. Kritisch waren hingegen die sehr großen Druckstauchungen im Bereich des Kämpfers. Hier kam es während des Versuchs zu einem Auspressen der im Gewölbe vorhandenen Feuchtigkeit.

Der zweite Versuch bestätigte die Vermutungen zum Einfluss der Abdichtungsschicht und der Stirnmauer. Beim zweiten Aufbringen der maximalen Last von 5,6 MN kam es zu einem Versagen der Verpresspfähle auf Mantelreibung, wodurch sich die Kraft kaum mehr konstant halten ließ. Der Widerstand der Verankerung war zu diesem Zeitpunkt erreicht und der Versuch wurde beendet.

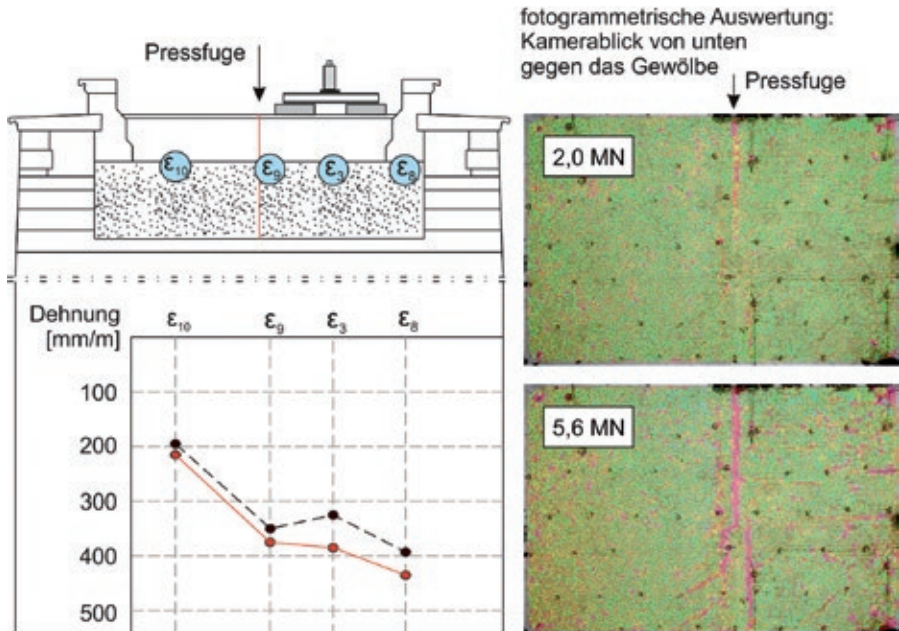


Bild 11: Ergebnisse von Dehnungsmessung und Fotogrammetrie zur Mitwirkung des Nachbarbogens  
Grafik: Gregor Schacht

### Einfluss Stirnwand

Der Einfluss der Stirnwand auf das Verformungsverhalten des Bogens war deutlich spürbar. Der Bogen wies im zweiten Versuch eine um ca. 25 % verminderte Steifigkeit und daraus resultierende größere Verformungen auf. In der Auswertung der Mittendurchbiegungen V2 des Bogens zeigt sich das weichere Tragverhalten. In Bild 10 wurden die Verformungen im ersten Lastzyklus der jeweiligen Laststufe ausgewertet und um die bis dahin eingetretenen Verformungen bereinigt.

### 4.2 Mitwirkung Nachbarbogen

Ein weiterer Untersuchungspunkt lag auf der Mitwirkung des Nachbargewölbes am Lastabtrag. Die beiden Gewölbebögen sind durch eine Pressfuge voneinander getrennt, so dass jeder Bogen die Last separat abträgt. In den Versuchen wurde diese Mitwirkung zum einen durch die Messung von Dehnungen an der Bogenunterseite ( $\epsilon_3$ ,  $\epsilon_8$ ,  $\epsilon_9$ ,  $\epsilon_{10}$ ) erfasst. Zusätzlich wurde die Bogenunterseite fotogrammetrisch überwacht. Wie in Bild 11 dargestellt, zeigen sowohl die Fotogrammetrie wie auch die Dehnungsmessungen, dass durch die Pressfuge eine Trennung beider Bögen vorliegt, aber dass sich der unbelastete Bogen doch am Lastabtrag beteiligt.

### 4.3 Vergleich mit anderen Messverfahren

Zur Erprobung neuer geodätischer Messtechniken für den Einsatz bei der In-situ-Untersuchung von Bauwerken wurden unter anderem das Laserscanning und das Lasertracking eingesetzt.

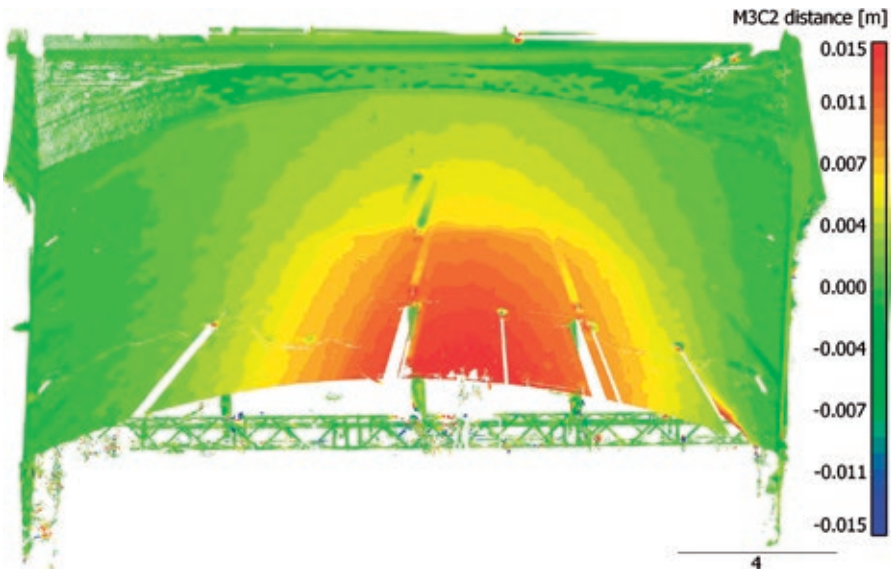


Bild 12: 3-D-Punktwolke-Differenzen (M3C2) für eine aufgebrachte Last von ca. 5 MN

Grafik: [13]



Diese Verfahren ermöglichen die Detektion von dreidimensionalen Objektveränderungen im unteren Millimeterbereich. Der Lasertracker zeichnet sich durch seine hochfrequente, punktuelle Absolutdistanzmessung auf diskret signalisierten Corner-Cube-Reflektoren (CCR) aus. Der Laserscanner hingegen ermöglicht die unmittelbare flächenhafte Erfassung von Oberflächen in Form einer 3-D-Punktwolke. Beide Sensoren ermöglichen eine Referenzierung ihrer Daten gegenüber einem übergeordneten, sensorunabhängigen Koordinatensystem. Die Verknüpfung des Tragwerks mit den Messungen von Laserscanner und Lasertracker erfolgte über identische Punkte im Vorfeld des Belastungsversuchs sowie einer Netzmessung mit einem Präzisionstachymeter Leica TS30 [13].

Bild 12 zeigt die Verformungen für die Laststufe 5 MN in einer 20-fach abgestuften Grauwertskala von  $\pm 15$  mm. Als maximale Verformung tritt hier ein Wert von 14 mm in unmittelbarer Umgebung der Gewindestangen der Lasteinleitung im Bereich des Scheitels des Gewölbes auf. Deutlich sichtbar ist die Abnahme der Verformung in Richtung der Brückenpfeiler sowie in Richtung zum benachbarten Bogen [14].

### 5 Schlussfolgerungen

Die Chance für Belastungsversuche an realen Bauwerken im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist für Bogenbrücken aus Mauerwerk äußerst selten. Die durchgeführten Untersuchungen haben gerade deshalb einen besonders hohen Wert. Der Beitrag präsentiert nur erste Ergebnisse der Auswertung der Versuche. Eine detaillierte Aus- und Bewertung wird in [7] erfolgen. In den Versuchen konnte eine Belastung bis in den plastischen Verformungsbereich aufgebracht werden, was eine wesentliche Voraussetzung für die Verifikation und Weiterentwicklung bestehender Berechnungsmodelle bildet.

Die Autoren hoffen, dass die durchgeführten Untersuchungen zu einem Umdenken bei der Bewertung von historischen Gewölbebrücken führen. Gerade der Einsatz numerischer Methoden in Kombination mit experimentellen Untersuchungen zur Modellkalibrierung kann zum Erhalt historisch wertvoller Baukultur beitragen.

### Literatur

- [1] Schacht, G.; Piehler, J.; Müller, J. Z. A.; Marx, S.: Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke. Bautechnik 94 (2017) 2, S. 125–130 – DOI: 10.1002/bate.201600084.
- [2] Eisenbahnjahr AusstellungsgmbH Nürnberg; Langner, U.; Rohmer, K.-H. (Hrsg.): Zug der Zeit – Zeit der Züge. Deutsche Eisenbahnen 1935–1985. Ein Führer durch die Ausstellung 15. Mai bis 18. August 1985 Nürnberg, Berlin: Siedler, 1989.
- [3] Bachmann, T.: Linden – Streifzüge durch die Geschichte. Erfurt: Sutton, 2012.
- [4] Wollenweber, B.: Historische Brückenkonstruktionen – Technische Bauwerke der Eisenbahn in Niedersachsen. Ein Beitrag zur Geschichte des Brückenbaus im 19. Jahrhundert. Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 33 (2006).
- [5] Prognose zur Nutzungsdauer der Allerbrücke bei Verden. Gutachten, IBW Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar, 4.2.2009, unveröffentlicht.

- [6] Marx, S.; Krontal, L.; Tamms, K.: Monitoring von Brückenbauwerken als Werkzeug der Bauüberwachung. *Bautechnik* 92 (2015) 2, S. 123–133 – DOI: 10.1002/bate.201500002.
- [7] Schacht, G.; Schwinge, E.; Krontal, L.; Hahn, O.; Marx, S.: Die Eisenbahnbrücke über die Aller bei Verden (1843–2016). In: Jäger, W. (Hrsg.): *Mauerwerkskalender 2018* (in Vorbereitung).
- [8] Franck, S. A.; Kothmayer, H.; Schulz, A.; Bretschneider, N.; Slowik, V.: Tragsicherheitsbewertung einer Mauerwerksgewölbebrücke mittels nichtlinearer Finite-Elemente-Simulationen. *Bautechnik* 90 (2013) 8, S. 475–484 – DOI: 10.1002/bate.201200025.
- [9] Franck, S. A.; Bretschneider, N.; Gebhardt, M.; Slowik, V.; Marx, S.: Simulation of cracking in masonry arch bridges. In: van Mier, J. G. M.; Ruiz, G.; Andrade, C.; Yu, R. C.; Zhang, X. (eds.): *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – Proc. of 8th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8)*, 11.–14.3.2013 in Toledo (Spain), 2013, pp. 868–876.
- [10] Schacht, G.; Bolle, G.; Marx, S.: Belastungsversuche – Internationaler Stand des Wissens. *Bautechnik* 93 (2016) 2, S. 85–97 – DOI: 10.1002/bate.201500097.
- [11] Schacht, G.; Bolle, G.; Marx, S.: Messen bei Querkraftversuchen – Technische Entwicklung und heutige Möglichkeiten. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 12, S. 875–887 – DOI: 10.1002/best.201300050.
- [12] Schacht, G.; Bolle, G.; Curbach, M.; Marx, S.: Experimentelle Bewertung der Schubtragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 6, S. 343–354 – DOI:10.1002/best.201600006.
- [13] Paffenholz, J.-A.; Stenz, U.: Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen. In: Lienhart, W. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung ,17 – Beiträge zum 18. Int. Ingenieurvermessungskurs*, 25.–29.4.2017 in Graz (Österreich), Berlin: Wichmann, 2017, S. 373–388.
- [14] Paffenholz, J.-A.; Alkhatib, H.; Stenz, U.; Neumann, I. (2017): Aspekte der Qualitätssicherung von Multi-Sensor-Systemen, *allgemeine vermessungsnachrichten (avn)* 124 (2017) 4, S. 79-91.