



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

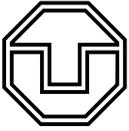
FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

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
Probebelastung 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
*Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Werner Daum,
Detlef Hofmann, Frank Basedau* 147

Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen mithilfe der dynamischen Eigenschaften
F. Weisleder, M. Waltering..... 159

Softwareunterstützte Nachrechnung und Ertüchtigung von Brückenbauwerken
Stefan Kimmich, Eckhard Held 175

Experimentelle Untersuchung zum Systemtragverhalten neugotischer Gewölbekonstruktionen

Jens Piehler¹, Michael Hansen², Gerd Kappahn³

Kurzfassung. Bei Gewölbekonstruktionen ist die horizontale Unverschieblichkeit der Gewölbekämpfer für die Standsicherheit von entscheidender Bedeutung. Für die Untersuchung und Bewertung von Gewölbekonstruktionen müssen realistische Ansätze für die Steifigkeit aller Bauteile, wie Außenwände, Strebepfeiler und Fundamente einschließlich Baugrund, getroffen werden. In diesem Beitrag wird ein Belastungsversuch beschrieben bei dem durch Eintragung einer geringen Horizontallast im Kämpferbereich signifikante Bauwerksreaktionen gemessen und damit die tatsächlich vorhandenen Bauteilsteifigkeiten realitätsnah beurteilt werden konnten.

Experimental study on system behaviour of neo-Gothic vault constructions – Abstract. At vaults the horizontal displacement of the abutments is vitally important for the structural safety. For the investigation and reviewing of vault constructions realistic approaches are necessary concerning to the stiffness of all members like exterior walls, buttress piers, foundations inclusive foundation soil. In this article a loading test is described. In the test it was possible to measure significant structure reactions due to a low horizontal load in the region of the abutments. These data can be used for a more realistic assumption of the existing member stiffness.

1. Einleitung und Zielsetzung

In der zweiten Hälfte des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts entstanden zahlreiche Bauwerke im neugotischen Stil. Als eine Zweigerscheinung des Historismus wurden in der Neugotik die gotischen Konstruktionen des 12. und 13. Jahrhunderts wieder aufgegriffen. Im Vergleich zur mittelalterlichen Gotik führten das Aufkommen einer ingenieurmäßigen Herangehensweise und die Forderung nach Materialeinsparungen zu wesentlich leichteren und dünnwandigeren Konstruktionen. Neben den für Gewölbe typischen Rissbildern sind in den Kappen und Bögen auch Schäden vorzufinden, welche sich auf konstruktions- bzw. herstellungsspezifische Ursachen zurückführen lassen.

In der Neugotik wurden die Gurt- und Gratbögen auf Lehrgerüsten hergestellt, wohingegen bei den Kappen zwischen den Bögen auf eine formtreue Schalung verzichtet und freihändig gemauert wurde [1]. Auf diese Weise entstanden europaweit mehrere Hundert Kirchen, bei denen die Kappen herstellungsbedingt oft keine stetigen Krümmungen aufweisen. Geringste Kämpferverschiebungen sowie eine Gewölbegeometrie, welche nicht der sich einstellenden Stützflächen entspricht, führen zu signifikanten Rissbildern. Ähnlich wie beim Bogen bilden

1 M.Sc. Dipl.-Ing. (BA), Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

2 Dr.-Ing. habil., Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

3 Dr. rer. nat., Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik mbH, Markkleeberg

sich einzelne Starrkörper aus [2]. Die sich einstellenden Risse zwischen den Starrkörpern werden auch als plastische Gelenke interpretiert, vgl. [3], [4], [5], [6].

Verschiedene Faktoren haben Einfluss auf die Rissbreitenänderungen. Beispielhaft sind Temperaturschwankungen, Quell- und Schwindverhalten des Mauerwerks, Grundwasserspiegelschwankungen, Baugrundsetzungen und andere exogene Baugrundbewegungen zu nennen. Ein entscheidender Punkt für die Standsicherheit des Gewölbes als Ganzes ist die horizontale Verschieblichkeit der Kämpfer. Daher sind für die Einschätzung und Untersuchung von Gewölbekonstruktionen realistische Annahmen der horizontalen Auflagersteifigkeiten erforderlich. Mit dem in diesem Beitrag beschriebenen Belastungsversuch wurden Bauwerksreaktionen unter definierten Beanspruchungen ermittelt. Mit den Ergebnissen können numerische Modelle verbessert und damit das globale Gleichgewicht von Gewölbekonstruktionen realitätsnah eingeschätzt werden.

Der im Folgenden beschriebene Belastungsversuch wurde im Rahmen des Forschungsprojekts Sicherung neugotischer Gewölbekonstruktionen [7] durchgeführt. In dem Forschungsprojekt werden typische Schadensbilder neugotischer Gewölbe mit dem Ziel analysiert, möglichst nachhaltige Sanierungsmaßnahmen zu finden. Die grundsätzlichen Probleme dieser Konstruktionen treten natürlich nicht nur bei Kirchen auf, sondern auch bei Profanbauten der Gründerjahre wie Schulen, Rathäuser oder Postbauten. Da deren Abmessungen jedoch vielfach kleiner sind und sich die Schadensbilder in wesentlich geringerem Ausmaß ausbilden, wurden die Untersuchungen auf neugotische Kirchenbauwerke beschränkt.

2 Referenzbauwerk

2.1 Historie und Tragstruktur

Für das Forschungsprojekt [7] diente die Christuskirche in Hildesheim als Referenzbauwerk (Bild 1). Sie weist nahezu alle typischen Merkmale neugotischer Gewölbekonstruktionen auf. Das Kirchenbauwerk entstand im Zuge der Abtrennung von St. Michaelis Anfang des 20. Jahrhunderts auf dem Moritzberg und wurde am 7.2.1904 geweiht [8]. Über die Jahre traten im Kircheninneren wiederholt größere Risse auf, welche im Zuge mehrerer Renovierungs- und Sanierungsmaßnahmen immer wieder erfolglos saniert wurden. In den 1990er Jahren wurde die Kirche abermals saniert, wobei auch die ursprüngliche Bemalung von 1904 zeit- und kostenaufwändig wiederhergestellt wurde. Im Zuge der Arbeiten wurden auch Maß-



Bild 1: Christuskirche in Hildesheim
Foto: Ingenieurbüro Götz & Illsemann

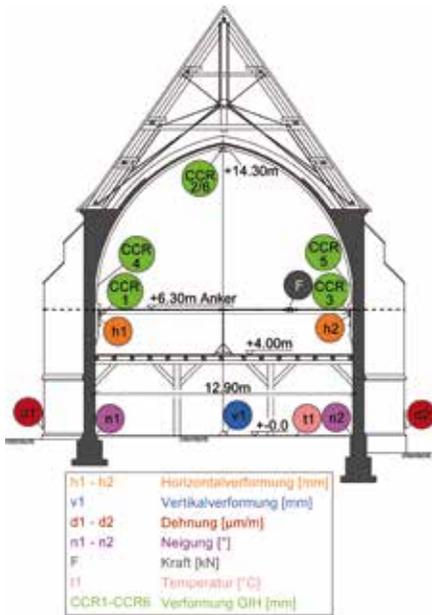


Bild 2 (links oben):
Schnitt A-A durch das Langhaus der Christuskirche mit Versuchs Aufbau und Messstellenplan, [9]

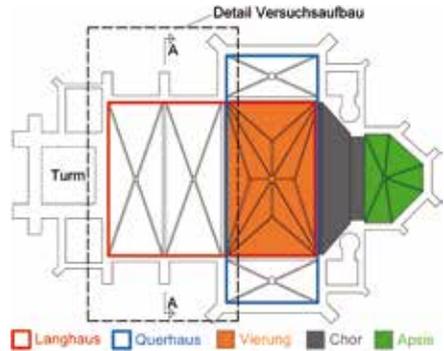
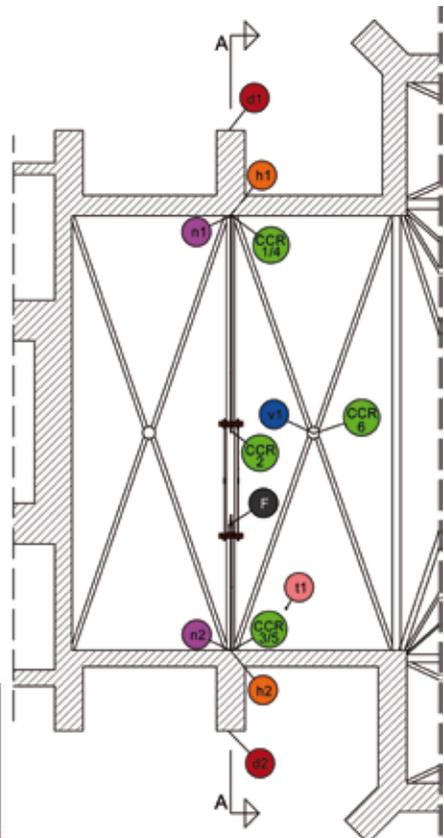


Bild 3 (rechts oben):
Grundriss mit Bezeichnung der beschriebenen Bereiche und des untersuchten Schnittes A-A (Bild 2), [9]

Bild 4 (rechts):
Detail Versuchs Aufbau und Messstellenplan in der Draufsicht, [9]



nahmen zur Begrenzung etwaiger horizontaler Kämpferverschiebungen durchgeführt. Dazu zählt der Einbau zusätzlicher Zugstäbe in das Hängesprengwerk des Dachtragwerks sowie ein Zuganker in Höhe der Kämpfer (Bild 2). In Bild 3 sind der Grundriss des Bauwerks und die Lage des in Bild 2 gezeigten Gebäudeschnittes dargestellt. Die Bilder 2 und 4 zeigen zudem die Lage der Messstellen im späteren Belastungsversuch.

Jedoch traten nach weniger als 15 Jahren erneut Risse im Gewölbe auf. Insbesondere zählen dazu im Bereich der Vierung Abrisse der Kappen von den Schildbögen zum Querhaus sowie breite Einzelrisse im Chorgewölbe.

Der Aufbau der Kirche folgt dem Eisenacher Regulativ von 1861 [10], wobei vermutlich aufgrund der Hanglage die Apsis nach Norden und nicht nach Osten ausgerichtet wurde. Die Höhe des Kirchturms im Süden beträgt etwa 55 m. Der Dachfirst liegt 22,5 m über dem Kirchenfußboden. Das Langhaus besteht aus zwei Jochen mit jeweils ca. 5,0 m Länge zwischen den Gurtbogenachsen. Sämtliche Gurt- und Rippenbögen besitzen einen oberliegenden gemauerten Querschnitt aus Vollziegeln. Für die Gewölbekappen wurden Bimsbetonsteine verwendet. Der Fugenverlauf, welcher sich auf dem Innenputz der Kappen abzeichnet, deutet auf freihändiges Mauern der Kappen ohne Schalung hin. Die statisch wirksame Querschnittsdicke der Kappen beträgt nach Abzug der Innenputzschicht und dem Mörtelverstrich an der Oberseite ca. 12 cm. Die Dicke der kuppelförmigen Schildkappen verspringt zu den Außenwänden hin im unteren Drittel auf die doppelte Steinstärke. Ursprünglich dienten allein die Strebepfeiler an den Außenwänden zur Aufnahme des Gewölbe- und Dachschubs (Bild 2). Der Zuganker im Schnitt A-A wurde erst 1997/98 eingezogen und an den Außenflächen der Strebepfeiler verankert. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen befand sich dieser Zuganker in einem lastlosen Zustand.

Das Dachtragwerk in den Gurtbogenachsen und an den Giebelinnenseiten ist als Hängesprengwerk konstruiert. Dazwischen spannen Pfetten, auf denen wiederum die Sparren aufliegen (Bild 2). Mit Hilfe dieser Hängesprengwerkstruktur war es den Erbauern möglich, das Gewölbe bis weit in den Dachraum ragen zu lassen. Ursprünglich waren je Hängesprengwerk nur zwei Zugstäbe vorhanden, welche jedoch nicht direkt im Bereich der Fußpfetten angreifen. Die später zusätzlich eingebrachten Zugstäbe binden näher an den Fußpfetten an und bewirken somit eine effizientere Rückhängung der auftretenden Horizontallasten aus der Dachkonstruktion. Die Auflagerkräfte der statisch unbestimmten Dachkonstruktion wurden in Nebenrechnungen bestimmt und bei den numerischen Analysen zur Vorplanung des Belastungsversuches berücksichtigt. Die Fundamente gründen auf Keuperton. Die Konsistenz reicht je nach Tiefe von steif über halbfest bis fest.

2.2 Vorausgegangene Messungen

Bereits im Jahr 2007 war ein mechanisches Messsystem für Verformungsmessungen im Chorbereich installiert worden [11]. Mithilfe eines zwischen den Gewölbekämpfern gespannten Invardrahtes wurde die Relativbewegung der Kämpfer periodisch gemessen. Optische Rissmarken an signifikanten Rissen ergänzten das Messkonzept. Die vorhandene Bodenschichtung sowie die Hanglage der Kirche gaben 2010 den Anlass, mittels Rammpegeln die Grund- und Sickerwasserstände um die Kirche herum sowie direkt unterhalb der Kirche zu überwachen. Diese vorausgegangenen Messungen wurden in dem aktuellen Forschungsprojekt genutzt,

weitergeführt und durch weitere Messsysteme ergänzt. So wurden 2012 die Rissweitenänderungen bei drei signifikanten Hauptrissen im Chorgewölbe mit auf Dehnmessstreifen basierenden Rissweitensensoren (Omega-Sensoren) kontinuierlich beobachtet.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme der Christuskirche wurde die gesamte Innengeometrie mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) flächenhaft vermessen. Bild 5 zeigt beispielhaft die 3D-Punktwolke aus dem Innenraum der Kirche. Die so entstandene „untere“ Punktwolke und die „obere“ Punktwolke aus dem Dachraum wurden über ein neu erstelltes Referenznetz zusammengeführt.

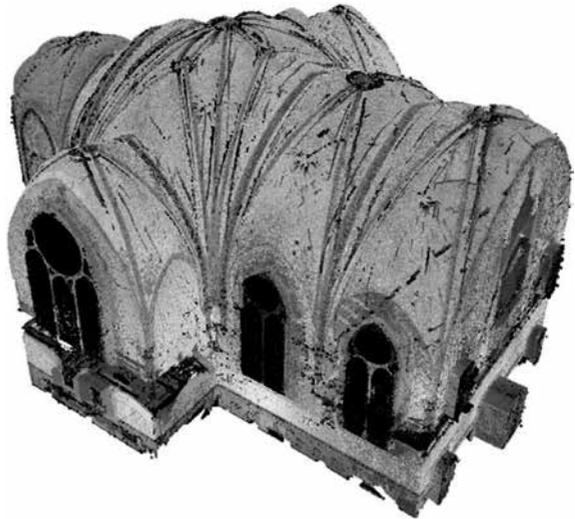


Bild 5: 3D-Punktwolke des vollständigen Innenraums [9]

Durch die Zusammenführung der beiden Punktwolken konnte auf die Gewölbegeometrie und auf die Schalen- und Bogendicken an jeder beliebigen Stelle geschlossen werden. Auf weitere Einzelheiten zu den im Projekt angewendeten geodätischen Messverfahren sei auf einen weiteren Beitrag im hier vorliegenden Tagungsband [12] verwiesen.

3 Belastungsversuch

Anders als bei klassischen Belastungsversuchen bestand das Ziel nicht in der Bestimmung einer zulässigen Grenztragast. Vielmehr sollten bei Eintragung einer definierten Kraft signifikante Bauwerksreaktionen gemessen werden, welche für die Kalibrierung von numerischen und ingenieurmäßigen Modellen herangezogen werden können. Zur Auswahl standen zwei Möglichkeiten:

1. die Einleitung einer vertikalen Kraft in den Schlussstein des Gewölbes über eine Zugstange und
2. die Nutzung des lastlosen Horizontalankers in Achse A-A (Bilder 2 und 3), um hierüber eine Horizontallast einzuleiten.

Im Rahmen der Versuchsplanung wurden diese Varianten diskutiert und der Horizontalkrafteinleitung der Vorzug gegeben.

Eine Schädigung der vorhandenen Bausubstanz sollte unter allen Umständen vermieden werden. Hierzu wurden Grenzwerte für die einzutragende Last sowie die daraus voraussichtlich

resultierenden Tragwerksverformungen für signifikante Messpunkte und Lasteinleitungsstellen festgelegt. Für die Abschätzung der zu erwartenden Messbereiche und die Dimensionierung des Versuchsaufbaus dienten numerische Voruntersuchungen, wobei die obere Grenzlast auch durch die zulässige Beanspruchung der vorhandenen Zugstangen einschließlich ihrer Verankerungselemente begrenzt war.

3.1 Numerische Voruntersuchungen

Unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen wurde für die numerischen Voruntersuchungen ein Viertel eines Joches des Langhauses modelliert (Bild 6). Die in Höhe des Zugankers berechneten horizontalen Kämpferverschiebungen aus Eigengewicht dienten als Anhaltswert

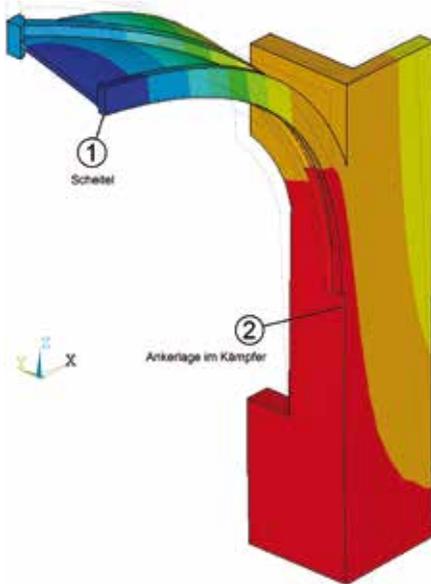


Bild 6: Ausschnitt des verformten und unverformten numerischen Modells und farbig angelegte Vertikalverformung u_z infolge ständiger Einwirkungen [9] (vgl. Tab.1)

für die Festlegung einer zulässigen Grenzverformung infolge der einzutragenden Horizontallast. Darüber hinaus wurde eine maximale Horizontalverformung der Kämpfer von 5 mm als unkritisch angesehen. Erfahrungsgemäß betragen langzeitliche horizontale Kämpferverschiebungen oft mehrere Zentimeter bis Dezimeter.

Für die Abschätzung der Verformungen erschien die Annahme linear-elastischen Materialverhaltens in erster Näherung ausreichend. Bei vergleichbaren Konstruktionen wird in [6] für gerissenes Mauerwerk ein Elastizitätsmodul von 3.000 N/mm^2 ohne Berücksichtigung der Kriechinflüsse vorgeschlagen. Für die Wände, Gurt- und Rippenbögen wurde dieser Wert ebenfalls angesetzt. Die Kappen aus Bimsbetonsteinen besitzen eine deutlich geringere Steifigkeit, sodass ein E-Modul von 1.200 N/mm^2 gerechtfertigt erschien. Die Fundamente wurden für die Voruntersuchungen als voll eingespannt angenommen. Für die Wände und Bögen wurde eine Wichte von 18 kN/m^3 angesetzt. Im numerischen Modell wurde nur die statisch wirksame Konstruktionsdicke der Kappen von 12 cm berücksichtigt. In dem Ansatz einer mittleren Wichte von 15 kN/m^3

für den wesentlich leichteren Bimsbeton sind auch die Lasten aus Putz und Mörtelverstrichen enthalten. Als Querdehnzahl wurde für alle Bauteile zu 0,25 angenommen.

Am Kopf der Außenwand greifen in der Achse des Gurtbogens die Auflagerkräfte aus dem Dachtragwerk an. In einer Nebenrechnung wurden diese mit 50 kN in vertikaler und 20 kN in horizontaler Richtung ermittelt. In Tabelle 1 sind die berechneten Ergebnisse für die signifikanten Punkte aus Bild 6 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 1: Berechnete Verschiebungen der numerischen Voruntersuchung [9]

Belastung	Horizontalverformung Punkt 2	Vertikalverformung Punkt 1
Ständige Einwirkungen	1,7 mm	-5,3 mm
Ständige Einwirkungen und 100 kN Ankerzugkraft	-0,2 mm	-2,1 mm
100 kN Ankerzugkraft	-1,9 mm	3,2 mm
Federsteifigkeit	19,0 mm/MN	32,0 mm/MN

Für die Kontrolle während der Versuchsdurchführung sind in der Tabelle auch die sich ergebenden, voraussichtlichen „Federsteifigkeiten“ ausgewiesen, denn die Annahme linear-elastischen Materialverhaltens ist nur eine grobe Näherung. Bei den experimentellen Untersuchungen muss von geringen irreversiblen Verformungsanteilen ausgegangen werden. Somit kann der Begriff „Federsteifigkeit“ nur als Veranschaulichung der Kraft-Verformungsbeziehungen im unteren Lastbereich gesehen werden, [9].

3.2 Versuchsaufbau

Bei der Planung des Versuchsaufbaus waren besondere Randbedingungen seitens des Betreibers zu berücksichtigen. Zum einen sollte in die vorhandene Bausubstanz nur marginal eingegriffen werden, zum anderen stand für alle durchzuführenden Arbeiten insgesamt ein Zeitfenster von nur fünf Tagen zur Verfügung. Darin enthalten war auch die Einhausung der Orgel mit einem Staubschutz sowie der Auf- und Abbau einer aufwändigen Einrüstung (Bild 7).

Der vorhandene Zuganker, in den die Last eingeleitet wurde, besteht aus mehreren Teilsegmenten, welche mit Schraubmuffen miteinander verbunden sind. Da der Anker ohne Vorspannung war, konnte der Ausbau eines Segments und die Integration der Belastungseinrichtung (Bilder 8 und 9) ohne zwischenzeitliche Baubehelfe realisiert werden.

Über zwei unabhängige Messsysteme wurden redundante Messungen an signifikanten Punkten im Gewölbe ermöglicht. Für die geodätischen Messverfahren sei an dieser



Bild 7: Innenansicht der Kirche aus der Vierung in Richtung Turm, [9]



Bild 8: Lasteinleitungsgeschirr für die Einleitung der Zugkraft [9]

Stelle auf den Beitrag *Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neogotischer Gewölbekonstruktionen* in diesem Tagungsband verwiesen [13]. Die für die Kontrolle der Lasteinleitung relevanten Messstellen aus Bild 6 und Tabelle 1 wurden direkt mit der Lasterzeugung gekoppelt. Damit konnten die Belastungs-Bauwerksreaktionskurven am Monitor direkt verfolgt werden, wodurch die Möglichkeit bestand, bei Bedarf sofort in das Belastungsregime eingreifen zu können. Darüber hinaus wurden auch weitere der in Bild 2 im Schnitt und in Bild 4 im Grundriss dargestellten Messstellen während des Versuchs überwacht. Dies betraf insbesondere die Messung der horizontalen Pfeilerverformungen an den Lastangriffspunkten, die Zugkraftmessung, die Dehnungs- und Neigungsmessungen an den Pfeilern sowie die der vertikalen Verformung des Gewölbescheitels.



Bild 9: In das vorhandene Zugankersystem integriertes Lasteinleitungsgeschirr in Schnitt A-A (vgl. Bilder 2 und 8), [9]

Die Horizontalverformungen der Pfeiler h_1 und h_2 wurden mit induktiven Wegaufnehmern (IWA) gegen gespannte Invardrähte (Bild 10) gemessen. Die Vertikalverformung v_1 des Scheitels wurde auf gleiche Weise gegen eine auf dem Boden befindliche Messbasis bestimmt.

Für die Dehnungsmessungen an den Außenseiten der Pfeiler kam ein System aus Invarstab und IWA zum Einsatz, mit dem eine relative Längenänderung ΔL bezogen auf eine Basislänge L von 1.100 mm ermittelt wurde. Dadurch konnte das Dehnungsverhalten des Mauerwerks über einen größeren Bereich abgebildet werden. Zum Schutz gegen direkte Sonneneinstrahlung wurde diese Konstruktion mittels Halbschalen abgedeckt.

3.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die nachfolgenden Ausführungen in diesem Unterkapitel sind unverändert [9] entnommen:

„Die Versuche fanden am 25.6.2014 ganztägig statt. Für die Versuchsdurchführung wurde in Anlehnung an die Richtlinie für Belastungsversuche [14] ein stufenweises Belastungsregime mit Zwischenentlastungen nach jeder Laststufe gewählt. Die Laststufen betragen jeweils 5 kN mit Haltephasen bis zur Messwertkonstanz, jedoch mindestens 15 Minuten. Für die stufenweise Belastung wurde eine hydraulische Handpumpe eingesetzt, mit der die Kraft bis zum jeweiligen Zielwert zusätzlich einer leichten Überschreitung von 0,5 kN für einen eventuellen Rückgang der Spannkraft in der Haltephase aufgebracht wurde. Der Spannkraftverlust fiel mit im Mittel 1,0–1,5 % bezogen auf den Maximalwert sehr gering aus. Die Haltephasen von 15 Minuten waren ausreichend, da sich auf allen Laststufen nach maximal zwei Minuten eine Messwertkonstanz einstellte. Bereits ab 5 kN sind kleine, bereits messbare Bauwerksreaktionen zu verzeichnen. Insbesondere der Gewölbescheitel weist ab 25 kN nach Entlastung geringe, bleibende Verformungen auf. Insgesamt bleibt das Kraft-Verformungs- und Kraft-Dehnungsverhalten bis zur Maximallast von 70 kN sowohl in horizontaler Richtung (Bild 11) als auch in vertikaler Richtung (Bild 12) näherungsweise linear. Die Neigungssensoren springen erst ab 35 kN zuverlässig an und zeigen bei 70 kN eine mittlere Neigung von ca. $0,003^\circ$, was bei reiner Verdrehung einer Pfeilerauslenkung von 0,3 mm am Lastangriffspunkt in ca. 6 m Höhe und damit etwa 50 % der maximalen Horizontalverschiebung entspricht. Während der Durchführung des Belastungsversuches hat sich die Innenraumtemperatur um ca. 1 K erhöht. Auf die taktilen Messungen mit IWA und Neigungssensoren hatte dies keinen signifikanten Einfluss.“

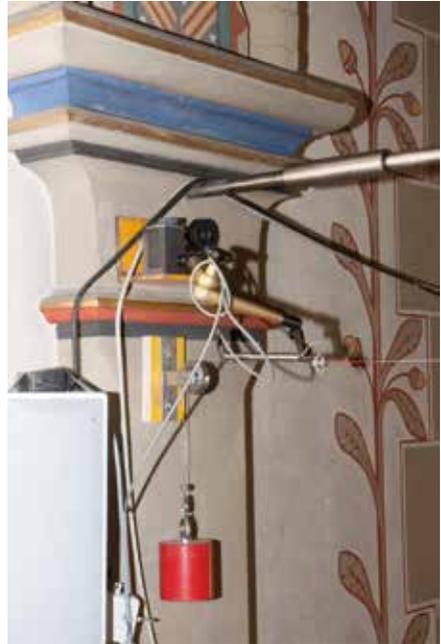


Bild 10: Anordnung zur Messung der Horizontalverschiebung, [9]

In Bild 11 ist zu erkennen, dass sich die Kämpfer bei einer Kraft von 70 kN um ca. $0,63 + 0,70 = 1,33$ mm verformen. Diese Größenordnung der Verformungen lässt sich auch mit einem Lasertracker verifizieren, welcher als zweites Messsystem zum Einsatz kam. Dieses geodätische Messverfahren ist in einem weiteren Beitrag [13] in diesem Tagungsband dokumentiert.

Die Messergebnisse verdeutlichen, dass die Steifigkeiten innerhalb der numerischen Voruntersuchungen zu gering angesetzt wurden. In dem durchgeführten Belastungsversuch reagiert das Tragwerk steifer. Die vorhandene Federsteifigkeit der horizontalen Lagerung in Höhe des Zugankers liegt mit einem Wert von ca. 11 mm/MN im Vergleich zu dem in Tabelle 1 angesetzten Wert von 19 mm/MN um den Faktor 1,7 höher. Mit dieser Erkenntnis wird es möglich, die zukünftigen numerischen Simulationen dieser Konstruktion realitätsnaher zu gestalten.

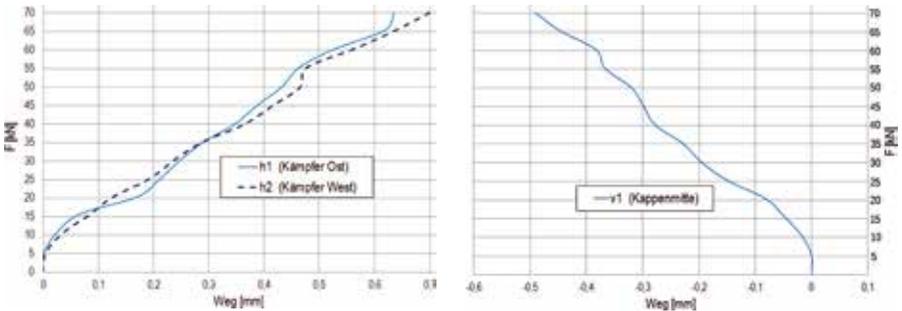


Bild 11 (links): Horizontale Verschiebung der Messstellen h1 und h2 am Kämpfer in Höhe des Zugankers (mit bleibender Verformung), Messwerte der induktiven Wegaufnehmer, [9]

Bild 12 (rechts): Vertikale Verschiebung der Messstelle v1 in Kappennitte (mit bleibender Verformung), Messwerte des induktiven Wegaufnehmers, [9]

4 Zusammenfassung

Gewölbe und insbesondere neugotische Gewölbe reagieren sensitiv auf Verformungen ihrer Lagerung, sodass sich bereits bei geringen Kämpferbewegungen signifikante Rissbilder einstellen. Für die Bewertung der Standsicherheit der Gewölbe sind die horizontalen Auflagersteifigkeiten von großer Bedeutung. Im Rahmen des Forschungsvorhabens *Sicherung neugotischer Gewölbekonstruktionen* [7] wurde ein Belastungsversuch durchgeführt, bei dem durch eine eingetragene Horizontalkraft von 70 kN in den Gewölbekämpfern eindeutige Bauwerksreaktionen beobachtet werden konnten. Die durch die Belastung erzwungenen Verformungen lagen je Kämpfer unter einem Millimeter, sodass eine Schädigung der vorhandenen Bausubstanz ausgeschlossen werden konnte. Trotz der geringen Verformungen war es möglich, eindeutige Bauwerksreaktionen zu messen, mit deren Hilfe sich Annahmen für strukturmechanische Modelle realitätsnaher einschätzen lassen.

Danksagung

Die Untersuchungen innerhalb des Verbundforschungsvorhabens *Sicherung Neugotischer Gewölbekonstruktionen* wurden durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur sowie die Landeskirche Hannover gefördert. Die Autoren danken den Fördermittelgebern, dem Kirchenvorstand der Christuskirche in Hildesheim sowie allen Projektbeteiligten für die konstruktive Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Wendeland, D.: Zur traditionellen Technik des freihändigen Gewölbebaus. *Mauerwerk* 8 (2004) 4, S. 153–158.
- [2] Holzer, S.: *Statische Beurteilung historischer Tragwerke, Band 1: Mauerwerkskonstruktionen*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [3] Barthel, R.: *Tragverhalten gemauerter Kreuzgewölbe*. Diss., Universität Karlsruhe (TH), 1991.
- [4] Barthel, R.: *Tragerhalten und Berechnung gemauerter Kreuzgewölbe*. *Bautechnik* 70 (1993) 7, S. 379–391.
- [5] Jagfeld, M.; Barthel, R.: *Zur Gelenkbildung in historischen Tragsystemen aus Mauerwerk*. *Bautechnik* 81 (2004) 2, S. 96–102.
- [6] Pieper, K.: *Sicherung historischer Bauten*. Berlin, München: Ernst & Sohn, 1983.
- [7] Hansen, H.; Piehler, J.; Götz, J.; Roeder, C.; Steinhäuser, H.; Neuner, H.; Schmitt, C.; Stenz, U.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I.; Kapphahn, G.: *Sicherung neugotischer Gewölbekonstruktionen*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2010–2015, finanziert durch das Ministerium für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen sowie die Landeskirche Hannover, Hannover, 2015.
- [8] <http://www.christuskirche-hildesheim.de/geschichte.html> [20.6.2015].
- [9] Piehler, J.; Hansen, M.; Kapphahn, G.: *Systemanalyse neugotischer Gewölbe – Teil 1: Voruntersuchungen und experimentelle Validierung*. *Bautechnik* 91 (2014) 11, S. 812–821; Zweitabdruck in *Mauerwerk* 19 (2015) 4, S. 312–326.
- [10] Fritsch, K. E. O.; *Vereinigung Berliner Architekten (Hrsg.): Der Kirchenbau des Protestantismus von der Reformation bis zur Gegenwart (1893)*. Berlin: Kommissions-Verlag von E. Toeche, 1893.
- [11] Steffens, K.: *Christuskirche in Hildesheim – Verformungsmessungen Gewölbe*. Untersuchungsbericht, PSI, Bremen, 2007.
- [12] Stenz, U.; Paffenholz, J.-A.; Hansen, M.; Piehler, J.; Neumann, I.: *Interdisziplinäre Beiträge für das Monitoring und die Sicherung von neugotischen Gewölbekonstruktionen*. In: Busch, W.; Knospe, S. (Hrsg.): *Tagungsband GeoMonitoring 2015, 5./6.3.2015 in Clausthal-Zellerfeld*, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Clausthal-Zellerfeld, S. 207–224.
- [13] Paffenholz, J.-A.; Stenz, U.; Neumann, I.: *Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen*. Beitrag im vorliegenden Tagungsband zum 8. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB)“, 24.9.2015, Dresden.
- [14] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Richtlinie für Belastungsversuche an Betonbauwerken*. Berlin: Beuth, 09/2000.