



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

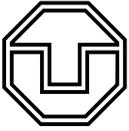
FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

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

Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen

Jens-André Paffenholz¹, Ulrich Stenz², Ingo Neumann³

Kurzfassung. Diese Untersuchung stellt einen Beitrag der geodätischen Messtechnik zur Kalibrierung von numerischen Simulationsmodellen, wie Finite-Element-Modellen, im Zuge von Bauwerksuntersuchungen vor. Die Stärken der geodätischen Messtechnik liegen in ihrer Langzeitstabilität sowie der zerstörungsfreien Erfassung eines großen dreidimensionalen (3D) Messvolumens mit einer Genauigkeit im μm -Bereich. Zum Erreichen der μm -Genauigkeit für 3D-Punktkoordinaten bei einem Messvolumen mit bis zu 40 m Kantenlänge wird ein Lasertracker mit interferometrischer und absoluter Distanzmessung eingesetzt.

Highly accurate 3D measurements at a neo-Gothic vault construction – Abstract. *This investigation introduces a contribution of the geodetic measuring technology to the calibration of numerical simulation models, like finite element (FE) models, in progress from building investigations. The strengths of the geodetic measuring technology are the long-time stability as well as the non-destructive acquisition of large three-dimensional (3D) measuring volumes with a precision in μm range. To reach μm precision for 3D point coordinates within a measuring volume with up to 40 m edge length a laser tracker with interferometric or absolute distance measurement is used.*

1 Motivation

Die Motivation zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen ist der im Vergleich zur gotischen Bauweise erheblich reduzierte Materialeinsatz in der Zeit von Mitte des 19. bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Neugotische Gewölbe sind aufgrund des minimalistischen Materialeinsatzes relativ anfällige Tragsysteme, die durch eine geringere Materialdicke und -dichte im Vergleich zu den gotischen Gewölben geprägt sind. Im Bereich der Kappen und Bögen der Deckengewölbe resultieren hieraus signifikante Rissbildungen.

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt „Sicherung neugotischer Gewölbekonstruktionen (SNG)“ [1] widmete sich unter Federführung des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover diesen Schadensbildern mit dem Ziel, geeignete und nachhaltige Sanierungsmaßnahmen zu identifizieren. Es erfolgt eine Fokussierung auf Sakralbauten, die aufgrund ihrer räumlichen Abmessungen im Vergleich zu kleinen, kompakteren neugotischen Bauwerken größere Schadensbilder aufweisen.

1 Dr.-Ing., Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover

2 Dipl.-Ing., Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover

3 Prof. Dr.-Ing., Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover

Der geodätische Beitrag zum SNG-Projekt ist vielfältig und erstreckt sich vom geodätischen Monitoring in unterschiedlichen zeitlichen Skalen bis hin zur umfassenden Geometrierfassung mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) [2]. Dieses dient einerseits der Erfassung des Ist-Zustandes und andererseits liefert die detaillierte dreidimensionale (3D) Punktwolke des TLS die Datengrundlage für Untersuchungen zur Optimierung des Geometriemodells im Bereich der Gewölbe. Initial lassen sich die Gewölbe durch geometrische Primitive beschreiben. In [3] wird eine realitätsnähere Anpassung durch Freiformflächen (B-Splines) untersucht.

Dieser Beitrag stellt das kurzzeitige Monitoring einer Gewölbestructur während eines hydraulischen Belastungsversuchs mit geodätischer Messtechnik zur Kalibrierung von numerischen Simulationsmodellen, wie Finite-Element-Modellen (FE-Modellen), vor. Die Stärken der geodätischen Messtechnik liegen in ihrer Langzeitstabilität sowie der zerstörungsfreien Erfassung eines großen 3D-Messvolumens mit einer Genauigkeit im μm -Bereich. Zum Erreichen der μm -Genauigkeit für 3D-Punktkoordinaten mit einem Messvolumen mit bis zu 40 m Kantenlänge wird ein Lasertracker mit interferometrischer und absoluter Distanzmessung eingesetzt. Das Ziel des messtechnisch begleiteten Belastungsversuchs ist die Bestimmung der horizontalen Auflagersteifigkeit einer Gewölbekonstruktion durch eine experimentelle Untersuchung eines Gurtbogens zwischen zwei Jochen.

2 Abriss zum Referenzbauwerk: Christuskirche Hildesheim

Die Christuskirche in Hildesheim dient aufgrund ihrer typischen, neugotischen Bauweise hinsichtlich der Geometrie der Deckengewölbe im Rahmen des SNG-Projektes als Referenzbauwerk.

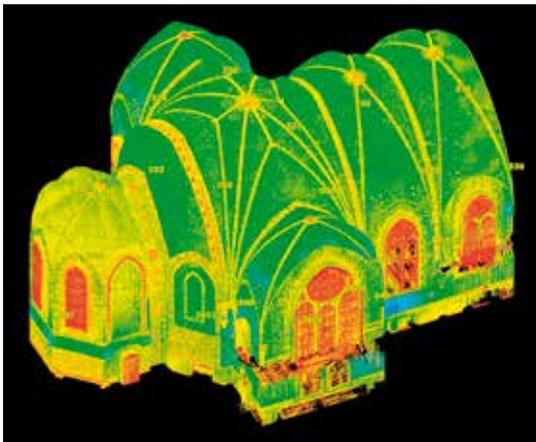


Bild 1: 3D-Punktwolke der Christuskirche aus TLS (Reflektivität farbcodiert), [2]

Nähere Informationen zum Bauwerk können bspw. im Beitrag von Piehler et al. im vorliegenden Band nachgelesen werden [4]. Bild 1 zeigt die 3D-Punktwolke der Christuskirche mit farbcodierten Reflektivitäten, wobei grün für gute und rot für schlechte Reflektivitätseigenschaften steht. Das Bauwerk wurde hierzu von 72 Laserscannerstandpunkten aus dem Innenraum sowie dem Dachbereich erfasst, für Details sei auf [2] verwiesen.

Der im Intensitätsbild der TLS-Daten in Bild 2 gezeigte Riss steht exemplarisch für die typischen, markanten Schäden, welche die Christuskirche zu einem geeigneten Referenzobjekt machen. Der

Fokus der Untersuchungen liegt aufgrund der signifikantesten Risse auf der Untersuchung sowie Modellierung der Deckengewölbe (Gewölbekappen). Die Gewölbekappen bestehen



Bild 2: Intensitätsbild der Rissbildung aus TLS-Daten, [2]

aus Bimsbetonsteinen, deren Dicke im oberen Gewölbeteil im Mittel ca. 16 cm beträgt, mit einem statisch wirksamen Querschnitt von ca. 12 cm. Die Kappendicke verspringt zu den Außenwänden im unteren Drittel auf die doppelte Steinstärke [5].

3 Belastungsversuch aus geodätischer Sichtweise

3.1 Einführung, Ziel und Vorbereitung der geodätischen Messungen

Der hydraulische Belastungsversuch hatte zum Ziel, die horizontale Auflagersteifigkeit der Gewölbekonstruktion zerstörungsfrei zu bestimmen. Für Details zur numerischen Voruntersuchung zur Bestimmung der oberen Grenzlast sowie zur detaillierten Darstellung des Aufbaus des eigentlichen Belastungsversuchs sei auf [4], [5] verwiesen. Die repräsentative, experimentelle Untersuchung ist an einem Gurtbogen zwischen zwei Jochen am Referenzbauwerk durchgeführt worden.

Das Ziel der geodätischen Messungen ist die wiederkehrende Bestimmung der lastinduzierten Verformungen als Erweiterung zu den klassischen Sensoren, wie induktive Wegaufnehmer und Neigungsmesser, mit einem Lasertracker. Verwendet wurde ein Lasertracker Leica LTD640, dessen technische Daten in Tabelle 1 zu finden sind. Die redundanten Messungen des Lasertrackers erfolgen auf spezielle Reflektoren (Corner Cube Reflektoren, CCR) in unmittelbarer Nähe zu den induktiven Wegaufnehmern. Durch Bestimmung der polaren Messelemente, Winkel und interferometrische sowie absolute Distanzmessung, zu den CCR mit Hilfe des Lasertrackers lassen sich Zeitreihen und zeitliche Änderungen von 3D-Punktkoordinaten bestimmen.

Tabelle 1: Spezifikationen des eingesetzten Lasertrackers Leica LTD640 (Herstellangaben) [6]

Parameter	Wert
Genauigkeit Winkelmessung (2σ)	15 μm + 6 $\mu\text{m}/\text{m}$
Genauigkeit Streckenmessung (2σ)	25 μm (statisch)
Genauigkeit 3D-Koordinaten (1σ)	15 μm + 6 $\mu\text{m}/\text{m}$ (statisch)
Messbereich	Maximalentfernung: 1,5 m bis 40 m Horizontalwinkel: 360 ° Vertikalwinkel: ± 45 °

Der hydraulische Belastungsversuch ist nach einem vorgegebenen, engen Zeitplan durchgeführt worden. Um die geodätischen Messungen zielgerichtet zu den vordefinierten Lastzuständen automatisch und sequentiell auf neun CCR auszuführen, wurde der Messablauf mit dem Lasertracker im 3D-Labor des Geodätischen Instituts der Leibniz Universität Hannover simuliert. Als Ergebnis ist der gesamte Erfassungsprozess in einem Skript zur Prozessautomation in der Software Leica Axyz implementiert worden. So konnte eine verzögerungsfreie Durchführung der Messungen vor Ort gewährleistet werden.

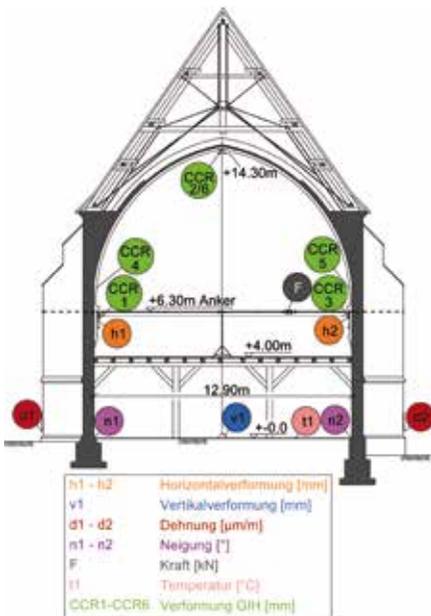


Bild 3: Gesamtübersicht aller Messstellen während des Belastungsversuchs im Schnitt A-A durch das Langhaus der Christuskirche, [5]

Am Vortag des eigentlichen Belastungsversuchs sind insgesamt neun CCR in speziellen magnetischen Halterungen temporär am Referenzbauwerk installiert worden. Sechs CCR wurden in unmittelbarer Umgebung des zu untersuchenden Gurtbogens angebracht (Bild 3, CCR1-CCR6). Die CCR 1 (unterhalb des Ankers) und 4 (oberhalb des Ankers) befanden sich in unmittelbarer Nähe zum induktiven Wegaufnehmer h1 im Kämpfer Ost und die CCR 3 (unterhalb des Ankers) und 5 (oberhalb des Ankers) entsprechend zu h2 im Kämpfer West. Im Schlussstein des zu untersuchenden Gurtbogens wurde CCR 2 installiert sowie CCR 6 im Schlussstein der Gewölbekonstruktion nördlich des zu untersuchenden Gurtbogens. Zusätzlich erfolgte die Installation von drei CCR im Altarraum zur Überprüfung der Stabilität des Lasertrackers während des Belastungsversuchs (Bild 4). Dieser Bereich weist eine ausreichende Entfernung zum experimentell untersuchten Gurtbogen im Chorbereich vor der Orgel auf,

so dass keine Beeinflussung der Stabilität durch die eingebrachte Last zu erwarten ist. Als Standpunkt für den Lasertracker wurde ebenfalls der Altarbereich mit einer maximalen Entfernung zu den CCR von ca. 30 m gewählt.

Aufgrund der elektrooptischen Streckenmessung ergibt sich die zwingende Notwendigkeit der Erfassung und Berücksichtigung der atmosphärischen Parameter (Temperatur und Luftdruck) während der Messungen. Hierzu wurde auf Temperatursensoren im Innenraum des Referenzbauwerkes sowie auf lokale Sensoren am Lasertracker zurückgegriffen.

3.2 Durchführung der geodätischen Messungen mittels Lasertracking

Die wesentlichen Parameter des Belastungsversuchs sind seine stufenweise Belastung mit Zwischenentlastungsstufen nach jeder Laststufe, hier 5 kN, sowie eine Haltephase bis zur Messwertkonstanz von mindestens 15 Minuten [5].

Bild 4 zeigt die Messkonfiguration und Lage der CCR 1–6 im Untersuchungsbereich sowie der CCR 7–9 im Altarbereich. Die sequentiellen Lasertrackermessungen zu allen neun CCR erfolgt im Uhrzeigersinn beginnend beim CCR 1 am Kämpfer Ost und wird im Folgenden als Messepoche bezeichnet. Pro Belastungsstufe sind vom Zeitpunkt der Einleitung der jeweiligen Kraft bis zum Erreichen der Messwertkonstanz Messepochen mit dem Lasertracker aufgezeichnet worden. Die aufeinanderfolgenden Messepochen haben einen Zeitabstand von ca. 2 Minuten. Für eine gesamte Belastungsstufe resultieren daraus ca. zehn Messepochen. Bereits vor Ort hat eine Plausibilitätsprüfung der erfassten Messepochen mit einem Matlab-Skript stattgefunden.

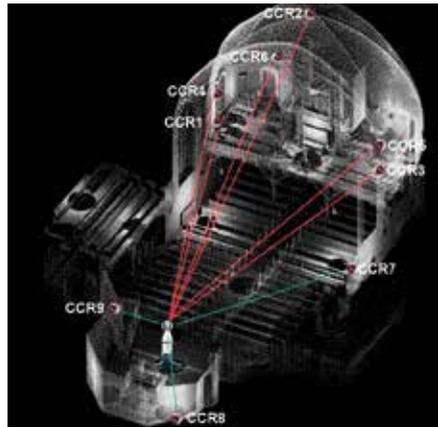


Bild 4: Messkonfiguration und Lage der CCR während des Belastungsversuchs, [2]

3.3 Ergebnisse der geodätischen Messtechnik

3.3.1 Stabilität des Lasertrackers während des Belastungsversuchs

Bild 5 fasst die Messungen auf die CCR 7 bis 9 zur Überprüfung der Stabilität des Lasertrackers während des Belastungsversuchs zusammen. Gezeigt sind die Streckenveränderungen berechnet aus den gemessenen 3D-Koordinaten, wobei die Streckenveränderungen auf die erste Messung (Nullepoche) vor Beginn des Belastungsversuchs reduziert sind. Es lässt sich festhalten, dass für alle drei CCR das Mittel der Streckenänderung über alle Messepochen über den Gesamtzeitraum des Belastungsversuchs $< 0,1$ mm ist. Für CCR 7 ergibt sich gegenüber den CCR 8 und 9, welche auf dem Boden des Referenzbauwerkes fixiert sind, eine größere Variation (Bild 5, obere Zeitreihe). Diese ist auf die Installation von CCR 7 am Kämpfer

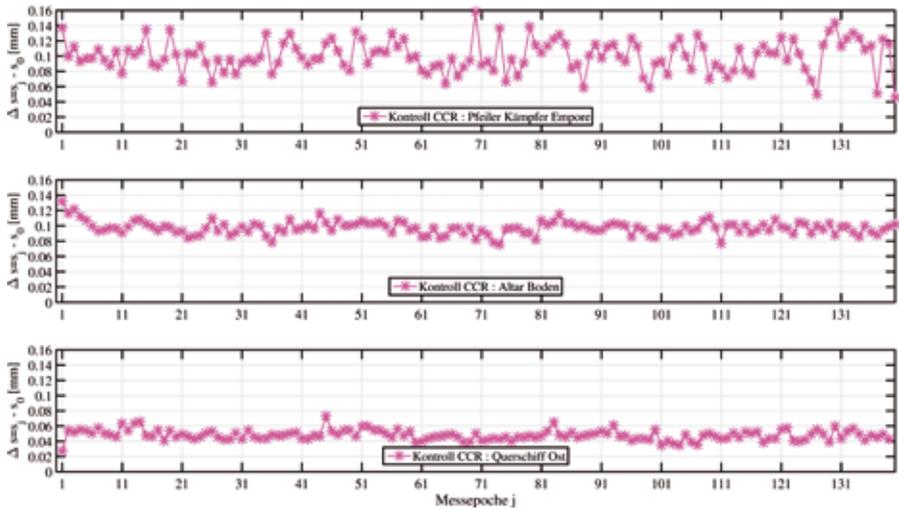


Bild 5: Zeitreihe der CCR 7 bis 9 im stabilen Bereich (Altarraum), [2]

der östlichen Empore zurückzuführen. Dieser Messaufbau gewährleistet, dass die Stabilität des Lasertrackers über den Zeitraum des Belastungsversuchs zu jeder Zeit gegeben war, so dass die Messungen auf die CCR 1 bis 6 uneingeschränkt von signifikanten äußeren Einflüssen betrachtet werden können.

3.3.2 Horizontale Verschiebung zwischen CCR 1 und CCR 3

Die wiederkehrende Bestimmung der lastinduzierten Verformungen wird im Folgenden an ausgewählten CCR im Gurtbogen hinsichtlich ihrer 3D-Lageveränderung betrachtet. Die Verformung lässt sich zum einen unmittelbar aus den polaren Messelementen des Lasertrackers und zum anderen aus den berechneten 3D-Koordinaten ableiten. An dieser Stelle sei auf den limitierenden Faktor der Winkelmessung des Lasertrackers im Messvolumen des Referenzbauwerkes hingewiesen. Aus diesem Grund wird für die abschließende Analyse, der aus den Lasertrackermessungen abgeleiteten Verformungen, auf die präzise Absolutstreckenmessung des Lasertrackers zurückgegriffen.

In Bild 6 sind die horizontalen Verschiebungen für die CCR 1 und 3 im Kämpfer Ost (h1, blau) und West (h2, cyan) für die Belastungsstufen von 45 kN bis 70 kN dargestellt. Die Verformungen im Kämpfer Ost (CCR 1) betragen in der maximalen Laststufe von 70 kN ca. 0,75 mm (blau) und im Kämpfer West (CCR 3) ca. 0,6 mm (cyan). Die Lage auf einer Achse des Referenzbauwerkes erlaubt die Bildung der Summe der gegenseitigen Verformung zwischen Ost und West, welche mit ca. 1,35 mm (grünfarbene Kurve) angegeben werden kann. Dabei erfolgt die Ableitung der gegenseitigen Verformung auf Basis der Streckendifferenzen. Die Ableitung der gegenseitigen Verformung aus 3D-Koordinaten führt zu einem deutlich höheren Rauschen im Bereich der Haltedauer der Belastung, vergleiche Bild 6 (magentafarbene

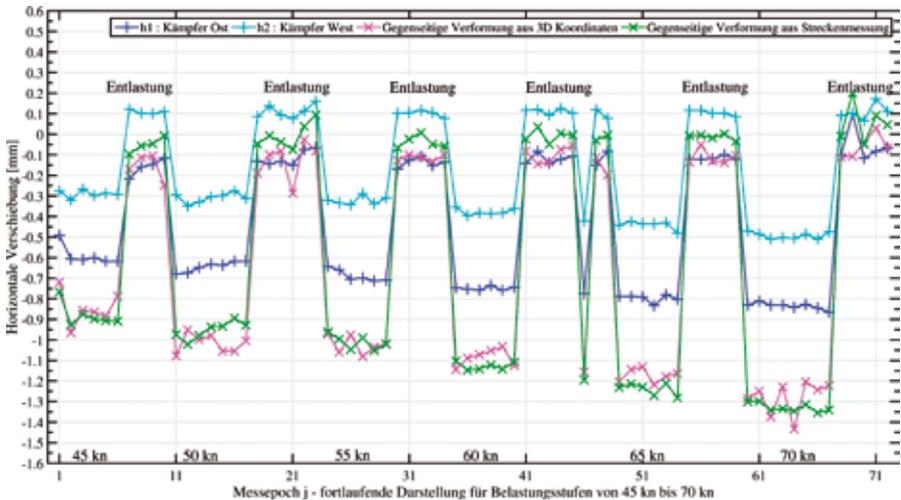


Bild 6: Zeitreihe der horizontalen Verschiebungen im Kämpfer Ost (CCR 1 in h1) und Kämpfer West (CCR 2 in h2) sowie Summe der gegenseitigen Verschiebungen, [2]

Kurve). Wie einleitend diskutiert, ist das höhere Rauschniveau auf die Winkelmessung des Lasertrackers zurückzuführen.

Abschließend lässt sich die aus den Lasertrackermessungen abgeleitete Verformung den taktilen Ergebnissen des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover gegenüberstellen. Als Fazit ist festzuhalten, dass die Ergebnisse eine hervorragende Übereinstimmung im Bereich von 1–2 Zehntelmillimetern [4], [5] aufweisen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Lasertracker hat für Punktverschiebungen und deren Übereinstimmung mit der taktilen Messtechnik im Rahmen eines hydraulischen Belastungsversuchs deutlich das Potential der geodätischen Messtechnik für Bauwerksuntersuchungen aufgezeigt. Als Stärken gegenüber den taktilen Messverfahren können dabei insbesondere die Langzeitstabilität sowie die zerstörungsfreie Erfassung von großen 3D-Messvolumen mit einer hohen Genauigkeit festgehalten werden. Der auf den gezeigten Ergebnissen aufbauende, geodätische Beitrag für die Kalibrierung des FE-Modells sowie die detaillierte Gegenüberstellung der klassischen, taktilen und geodätischen Messtechnik für weitere Messstellen befinden sich in Vorbereitung [7].

Danksagung

Das Verbundforschungsvorhaben „Sicherung Neugotischer Gewölbekonstruktionen (SNG)“ wurde 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 Zu-

sammenarbeit bei den zahlreichen experimentellen Untersuchungen und insbesondere beim abschließenden Belastungsversuch.

Literatur

- [1] 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.
- [2] 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, TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Marktscheidewesen, 2015, S. 207–224.
- [3] Schmitt, C.; Neuner, N.; Neumann, I.; Piehler, J.; Hansen, M.; Marx, S.: Erstellung von Ist-Geometrien für strukturmehchanische Berechnungen. In: Wieser, A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung '14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, 14.–18.01.2014 in Zürich, Heidelberg: Herbert Wichmann, 2014, S. 37–48.
- [4] Piehler, J.; Hansen, M.; Kapphahn, G.: Experimentelle Untersuchung zum Systemtragverhalten neugotischer Gewölbekonstruktionen. Beitrag im vorliegenden Tagungsband zum 8. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB) am 24.9.2015 in Dresden.
- [5] Piehler, J.; Hansen, M.; Kapphahn, G.: Systemanalyse neugotischer Gewölbe – Teil 1: Voruntersuchungen und experimentelle Validierung. Bautechnik 91 (2014) 11, S. 812–821.
- [6] Leica Geosystems AG: Hardware Guide – Leica Laser Tracker, 2005.
- [7] Paffenholz, J.-A.; Stenz, U.; Piehler, J.; Hansen, M.; Neumann, I.: Systemanalyse neugotischer Gewölbe – Teil 2: Geodätische Messverfahren und Auswertemethoden, Manuskript in Vorbereitung für die Zeitschrift Bautechnik, 2015.