

Integration von Lasertracking und Laserscanning zur optimalen Bestimmung von lastinduzierten Gewölbeverformungen

Jens-André PAFFENHOLZ und Ulrich STENZ

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die dreidimensionalen (3D)-Messverfahren des Lasertracking und des Laserscanning bieten dem Geodäten ausgezeichnete Möglichkeiten zur Bestimmung von Objektveränderungen im unteren Millimeterbereich bis hin zum Sub-Millimeterbereich. Der Lasertracker zeichnet sich durch seine hochfrequente, punktuelle Absolutdistanzmessung auf diskret signalisierte Corner Cube Reflektoren (CCR) aus. Der Laserscanner hingegen ermöglicht die unmittelbare flächenhafte Erfassung von Oberflächen in Form einer 3D-Punktwolke. Beide Sensoren ermöglichen eine Referenzierung ihrer Daten gegenüber einem übergeordneten, sensorunabhängigem Koordinatensystem.

Hieraus ergibt sich die Motivation für den kombinierten Einsatz beider Sensoren im interdisziplinären Umfeld der experimentellen Untersuchung des Tragverhaltens einer Gewölbebrücke. Ziel dieser Untersuchung ist die Kombination numerischer Modelle und experimenteller Untersuchungen zur Modellkalibrierung (Schacht et al. 2016). Der geodätische Beitrag ist die Bestimmung der lastinduzierten Verformung in einem Bereich von wenigen Millimetern. Diese geodätische Bestimmung erfolgt im Gegensatz zu den relativen eindimensionalen (1D)-Messungen im Bereich der Baumesstechnik vollständig in 3D.

Dieser Beitrag geht auf die Rahmenbedingungen zur Bestimmung von (vertikalen) Verformungen im Bereich weniger Millimeter mit dem Laserscanner und Lasertracker ein und zeigt erste Ergebnisse der individuellen Auswertungen. Die weitere Zielsetzung des Beitrages ist die Diskussion einer optimalen flächenhaften Beschreibung der lastinduzierten Gewölbeverformung durch eine gemeinsame Auswertung von 3D-Punktwolken und hochgenauen und hochfrequenten, diskreten Absolutdistanzmessungen.

1.2 Das Tragwerk – die historische Gewölbebrücke über die Aller

Die historische Allerbrücke bei Verden, Niedersachsen, war eine Gewölbebrücke für den Eisenbahnverkehr, die nach über 150 Jahren der Nutzung im Jahr 2015 außer Betrieb gegangen ist und durch eine neue Stahlbrücke ersetzt wurde. Vor dem endgültigen Abbruch der Gewölbebrücke Mitte 2016 ergab sich die einmalige Chance der experimentellen Untersuchung des Bauwerkes mit dem Ziel Informationen über das Tragverhalten dieses Brückentyps über das Gebrauchslastniveau hinaus zu erhalten. Der Belastungsversuch ist durch zwei getrennte Versuche (V1 im März 2016 und V2 im Juni 2016) als Kooperationsprojekt von Partnern aus Forschung und Wirtschaft durchgeführt worden.

Die alte Allerbrücke bestand aus kreisförmigen Bögen aus Ziegelmauerwerk mit einer lichten Weite von ca. 14 m, einer Bogenbreite von ca. 8 m und einem Stich von ca. 2 m. In der Breite waren die Bögen längs der Bauwerksachse durch eine mittige Pressfuge getrennt. Abbildung 1 zeigt den Blick von Westen auf den zur experimentellen Untersuchung ausgewählten Bogen 4 südlich der Aller im Zuge des Belastungsversuchs V2.

Im Zuge des Belastungsversuchs sollte die Gebrauchslast von 1,0 MN (100 t) deutlich überschritten werden, sodass erste nichtlineare Verformungen detektiert werden können. Nach SCHACHT et al. (2016) und den dort zitierten Quellen ergab sich aus numerischen Simulationen die Notwendigkeit einer Belastung mit etwa dem fünffachen der Gebrauchslast. Es wurde eine maximale Last von ca. 6 MN festgelegt, die mithilfe von vier Hydraulikzylindern erzeugt wurde. Diese wurden auf dem Brückenbogen installiert (vgl. Abb. 1). Zur Erzeugung der Gegenkraft wurden unterhalb der Brücke Verpresspfähle bis zu 18 m tief in den Boden getrieben. Die Verbindung zwischen Hydraulikzylinder und Verpresspfählen bildeten Gewindestangen. Eine detaillierte Beschreibung des Tragwerkes sowie der Versuchsplanung findet sich ebenfalls in SCHACHT et al. (2016).



Abb. 1: Blick von Westen auf den Bogen 4 der historischen Gewölbebrücke über die Aller bei Verden im Rahmen von V2 im Juni 2016. Der geweißte Bereich an der Gewölbeunterseite kennzeichnet den Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung. Im Vordergrund: Messbasis für die Bestimmung der Vertikalverformungen an drei diskreten Stellen. Auf der Brücke: vier Hydraulikzylinder zur Lastaufbringung.

1.3 Der Belastungsversuch V2 im Juni 2016

Die Federführung des interdisziplinären Belastungsversuchs hatte das Institut für Massivbau, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover (LUH) inne. Weitere Beteiligte waren das Institut für experimentelle Mechanik Leipzig, das Institut für Materialprüfung der Jade Hochschule Oldenburg, das Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar GmbH und die Marx Krontal GmbH. Aus dem Bereich der Geodäsie waren folgenden Institute beteiligt:

- Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technische Universität Berlin mit einem Laserscanner und einem Stereokamerasystem;

- Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technische Universität Braunschweig mit einem terrestrischen Radarsensor;
- Geodätisches Institut Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik der Technische Universität Darmstadt mit einem Profillaserscanner;
- Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformation der Jade Hochschule Oldenburg mit einem Kamerasystem;
- Geodätisches Institut Hannover (GIH) der LUH mit einem Laserscanner und einem Lasertracker.

Dieser Beitrag fokussiert auf die Ergebnisse sowie erste Auswertungen des GIH für den Belastungsversuch V2 im Juni 2016. Eine umfassende und detaillierte Aus- und Bewertung von V1 (März 2016) und V2 aller zuvor genannten Beteiligten wird unter anderem im AUTOREN-KOLLEKTIV (2018) erfolgen.

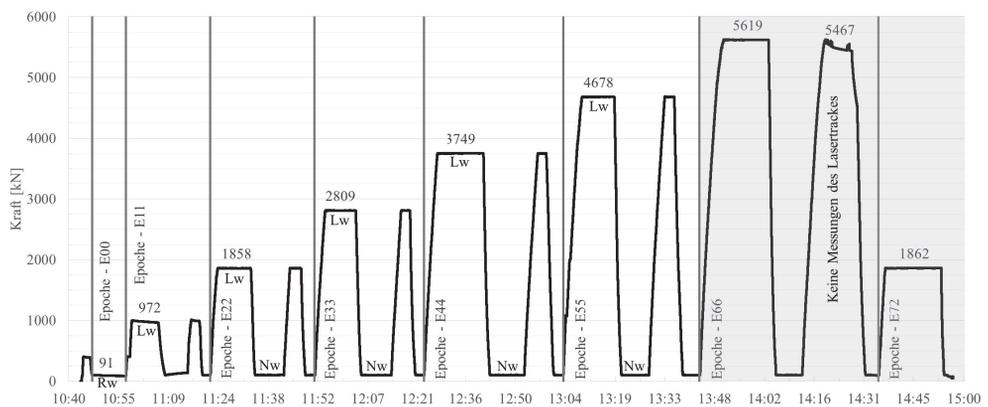


Abb. 2: Belastungsregime von V2 im Juni 2016 mit Angabe der Last pro Stufe in kN über die Zeit. Die vertikalen Markierungen begrenzen die Epochen der geodätischen Sensoren Laserscanner und Lasertracker. Eine Epoche (E) definiert sich durch eine Laststufe (Lw) und das darauffolgende Grundlastniveau (Nw) unter Hinzunahme einer laufenden Nummer [0,7] sowie der ganzzahligen Last in MN [0,6]. Die Referenz- bzw. Nullepoche ist definiert als E00Rw.

Abbildung 2 zeigt das realisierte Belastungsregime im Rahmen von V2 im Juni 2016. Eine Laststufe ergab sich aus einer sukzessiven Steigerung der Last um ca. 1 MN, gefolgt von einer Entlastung auf ein Grundlastniveau von ca. 100 kN. Grundsätzlich wurde jede Laststufe zweimal angefahren und für einen zuvor definierten Zeitraum konstant gehalten (SCHACHT et al. 2016). Unter Berücksichtigung der Gesamtversuchsdauer war die Haltezeit des jeweils ersten Anfahrens auf die zeitintensive Erfassung einer 3D-Punktwolke mit dem Laserscanner abgestimmt.

Das GIH hat einen Laserscanner Zoller+Fröhlich (Z+F) Imager 5006 zur Erfassung einer 3D-Punktwolke der vollständigen Gewölbeunterseite sowie einen Lasertracker Leica AT960-LR zur Bestimmung von diskret signalisierten Punkten im Bereich der Gewölbeunterseite mit dem Ziel der Feststellung von lastinduzierten Verformung eingesetzt. Im Rahmen der

Grobplanung der Standpunkte für beide Sensoren galt es einen Bereich außerhalb des potenziellen Gefahrenbereichs unmittelbar unterhalb des Gewölbes zu identifizieren, sodass ein mögliches Versagen des Gewölbes nicht zu einem Verlust der teuren Sensoren führen konnte aber dennoch eine optimale Erfassung der Gewölbeunterseite ermöglicht. Der Standpunktbereich von Lasertracker und Laserscanner wurde unter Berücksichtigung der maßgeblich, genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren wie Auftreffwinkel (Laserscanner) und Objektentfernung (Laserscanner und Lasertracker) östlich des zu untersuchenden Bogens 4 unterhalb der neuen Allerbrücke gewählt. Abbildung 3 zeigt den Blick von Osten in den Bogen 4. Der geweißte Bereich an der Gewölbeunterseite kennzeichnet den Bereich der unmittelbaren Lasteinleitung und enthält die vier Gewindestangen als verbindendes Element zwischen den Hydraulikzylindern auf der Brücke und den als Verankerung im Erdreich dienenden Verpresspfählen.

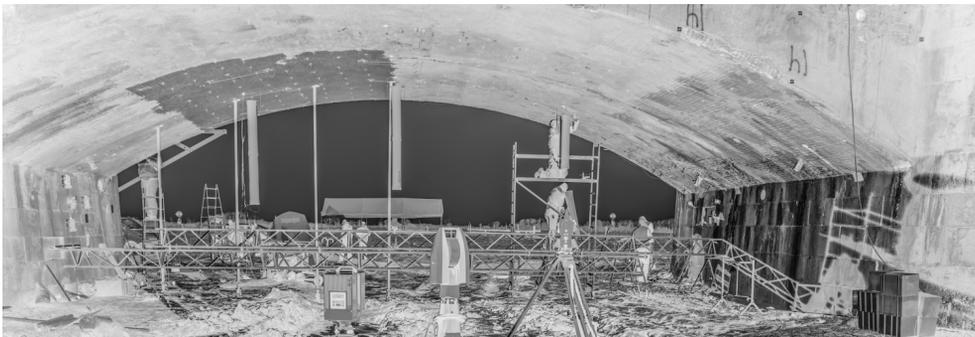


Abb. 3: Blick in die historische Gewölbebrücke über die Aller bei Verden während der Installation der Messtechnik. Der geweißte Bereich an der Gewölbeunterseite kennzeichnet den Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung, die durch die vier Hydraulikzylindern oberhalb und die senkrecht nach unten verlaufenden Gewindestangen und schlussendlich die Verpresspfähle realisiert ist. Im Vordergrund die geodätischen Sensoren des GIH (von links): Laserscanner Z+F Imager 5006, Lasertracker Leica AT960-LR und Präzisionstachymeter Leica TS30.

Für die gemeinsame Betrachtung der 3D-Punktwolke und der diskreten Punktmessungen mit dem Lasertracker wurde ein gemeinsames Datum am Tragwerk festgelegt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im nordöstlichen Punkt des Bogens am Übergang zum nördlichen Kämpfer, die positive x-Achse zeigt nach Osten, die positive y-Achse in Richtung der Bauwerksachse nach Süden und die positive z-Achse nach unten ins Gewölbe mit dem Ursprung in Scheitelhöhe (vgl. Abb. 8). Die Wahl und Betrachtung der Messungen im zuvor skizzierten Koordinatensystem erlaubt die unmittelbare Angabe einer vertikalen Verformung aus der jeweiligen z-Komponente der erfassten 3D-Daten. Die Verknüpfung des Tragwerks mit den Messungen von Laserscanner und Lasertracker ist über identische Punkte im Vorfeld des Belastungsversuchs sowie einer Netzmessung mit einem Präzisionstachymeter Leica TS30 erfolgt. Die identischen Punkte sind durch magnetische Halter signalisiert, die neben dem CCR für die Lasertrackermessung auch spezielle flächenhafte Zielzeichen für die Laserscannermessung aufnehmen können (PAFFENHOLZ et al. 2017).

1.4 Einordnung und Möglichkeiten zur Ableitung von Verformungen aus 3D-Punktwolken und punktuellen Lasertrackermessungen

Die Nutzung des terrestrischen Laserscannings (TLS) im Bereich des geodätischen Monitorings und der bisher traditionell durchgeführten punktbasierten Deformationsanalyse hinzu einer TLS-basierten Deformationsanalyse ist ein hochaktuelles Forschungsfeld mit gelösten Fragestellungen und neuen Herausforderungen, die sich insbesondere aus der flächenhaften Datenerfassung und der damit verbundenen hohen Punktdichte ergeben. Für die Erfassung von Bauwerks- und Objektveränderungen mit 3D-Punktwolken finden sich in der Literatur Beispiele für Infrastrukturbauwerke, wie Brücken (LIEBIG et al. 2011), Staudämme (ELING 2009), Stützwände (HAUPT & PAFFENHOLZ 2016), Tunnel (OHLMANN-BARTUSEL 2009) und Bauwerke wie ein Radioteleskop (HOLST et al. 2015). Eine, wenn nicht die zentrale Herausforderung ist die geeignete Modellierung der 3D-Punktwolken zur anschließenden Ableitung von Objektveränderungen. NEUNER et al. (2016) geben einen detaillierten Überblick zur Modellierung von 3D-Punktwolken ausgehend von der in OHLMANN-LAUBER & SCHÄFER (2011) vorgeschlagenen Klassifizierung nach Modelltypen zur Ableitung von Deformationen, Modellierungsmethoden sowie Typ des Messobjektes. Hinsichtlich der Modellierungsmethoden unterscheiden OHLMANN-LAUBER & SCHÄFER (2011) Verfahren, die unmittelbar mit den Daten der 3D-Punktwolke arbeiten (punkt- und punktwolkenbasiert) und Verfahren, die eine Modellierung der 3D-Punktwolke (oberflächen-, geometrie- und parameterbasiert) vor die Ableitung von Objektveränderungen stellen. HOLST & KUHLMANN (2016) arbeiten in ihrer Publikation fünf Herausforderungen der TLS-basierten Deformationsanalyse heraus. WUNDERLICH et al. (2016) berichten allgemein über die Herausforderungen, die mit der flächenhaften Deformationsanalyse aus 3D-Punktwolken verbunden sind. Sie zeigen Strategien für den Weg zu einer strengen Deformationsanalyse und Signifikanztests auf, die in den eingangs genannten Literaturstellen nicht zwingend erfolgen.

Der Einsatz des Lasertrackers für das Bauwerksmonitoring ist bisher weniger verbreitet. Durch die hochgenaue und hochfrequente, punktuelle Absolutdistanzmessung basierend auf einem Interferometer bieten sich interessante Möglichkeiten von der Nutzung als Referenz-/Validierungssensor (PAFFENHOLZ et al. 2015, SCHMITT 2014; STENZ et al. 2015) bis hin zur Kalibrierung numerischer Simulationsmodelle (Finite-Elemente-Modelle) (YANG et al. 2016). Typische erzielbare Genauigkeiten mit einem Lasertracker für eine statische 3D-Koordinate unter Berücksichtigung der atmosphärischen Parameter liegen im Bereich von $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ (1σ ; maximum permissible errors (MPE)) bei einem maximalen Messvolumen von 160 m (eingesetzter Lasertracker Leica AT960-LR, Angaben aus dem Datenblatt des Herstellers).

Im Folgenden fokussiert dieser Beitrag auf die punktwolkenbasierte Ableitung von Verformungen aus 3D-Punktwolken des Laserscanners sowie die Auswertung der hochgenauen, punktuellen Messung diskreter Punkte an der Gewölbeunterseite mit dem Lasertracker. Darauf aufbauend wird die Synergie beider Sensoren respektive gewonnenen Daten bezüglich einer verbesserten Ableitung von Verformungen diskutiert.

2 3D-Punktwolken zur Ableitung von Verformungen

2.1 Standpunktanalyse für das 3D-Punktwolken-basierte Monitoring

Der eigentlichen Auswertung der erfassten 3D-Punktwolken vorangestellt ist eine Standpunktanalyse unter Einbeziehung der intensitätsabhängigen 3D-Genauigkeit (σ_{xyz}) der 3D-Punktwolke. Diese basiert auf einem Intensitäts-basierten stochastischem Modell nach WUJANZ (2016) für den eingesetzten Laserscanner Z+F Imager 5006. Die nach WUJANZ (2016) notwendigen 1D-Messungen mit dem Laserscanner zur Bestimmung der Parameter des Intensitäts-basierten stochastischen Modells wurden in unabhängigen Laborexperimenten durchgeführt. Mithilfe dieser Parameter und Vorinformationen bezüglich der zu erwartenden epochenweisen Verformungen des Gewölbes im Bereich von wenigen Millimetern werden nach TIMMEN (2016) Genauigkeitsklassen für die Visualisierung der 3D-Punktwolke als stochastische 3D-Punktwolke definiert.

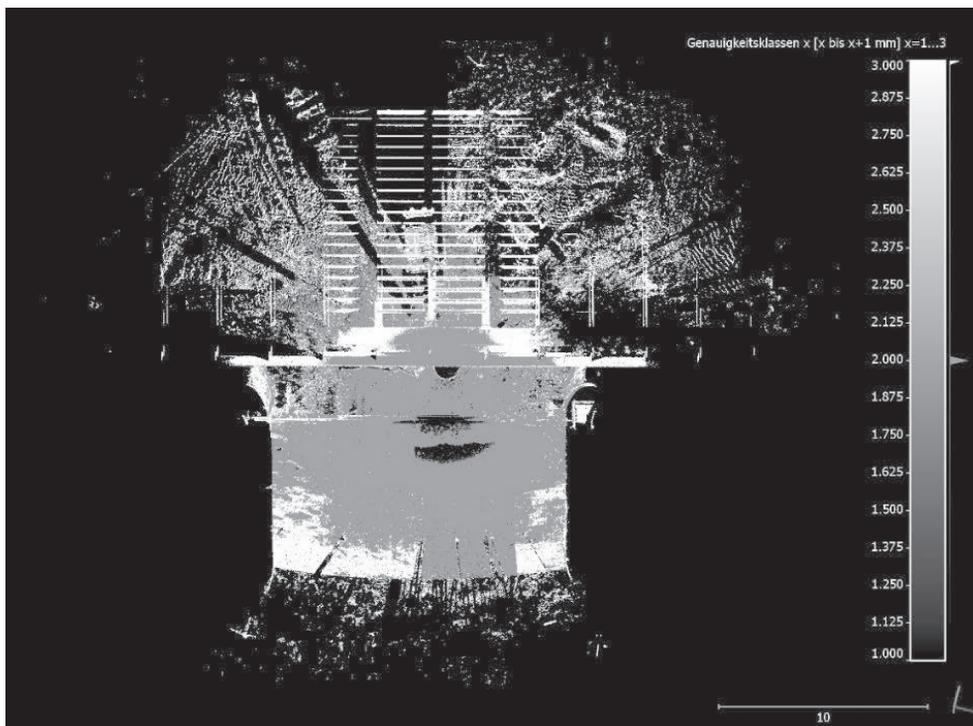


Abb. 4: Blick von oben auf die stochastische 3D-Punktwolke eingefärbt nach Genauigkeitsklassen: 1: $[0, 1[$ mm; 2: $]1, 2]$ mm; 3: $]2, \infty]$ mm. Der obere Teil zeigt die Stahlkonstruktion der neuen Allerbrücke, der untere Teil das interessierende Gewölbe.

Die Standpunktanalyse wird mithilfe der 3D-Punktwolke der Referenzepoche E00Rw durchgeführt. Diese wird nach TIMMEN (2016) durch einen effizienten Algorithmus innerhalb von 15 Minuten basierend auf den Parametern des Intensitäts-basierten stochastischen Modells

in drei Genauigkeitsklassen eingeteilt: 1: $[0,1]$ mm, 2: $]1,2]$ mm und 3: $]2,\infty]$ mm. Abbildung 4 zeigt die resultierende stochastische 3D-Punktwolke. Bereiche der Genauigkeitsklassen 1 und 2 ermöglichen die eingangs genannte Identifikation von Verformungen im Bereich weniger Millimeter. Bereiche der Genauigkeitsklasse 3 hingegen erlauben keine zuverlässige Trennung von Verformung und stochastischen Einflüssen der 3D-Punktwolke. Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass der gewählte Standpunkt geeignet war. Abbildung 5 zeigt als vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 4, dass insbesondere der Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung (vgl. Abb. 3, weißer Bereich um die Gewindestangen) und weite Teile der Gewölbeunterseite in die Genauigkeitsklassen 1 und 2 fallen.

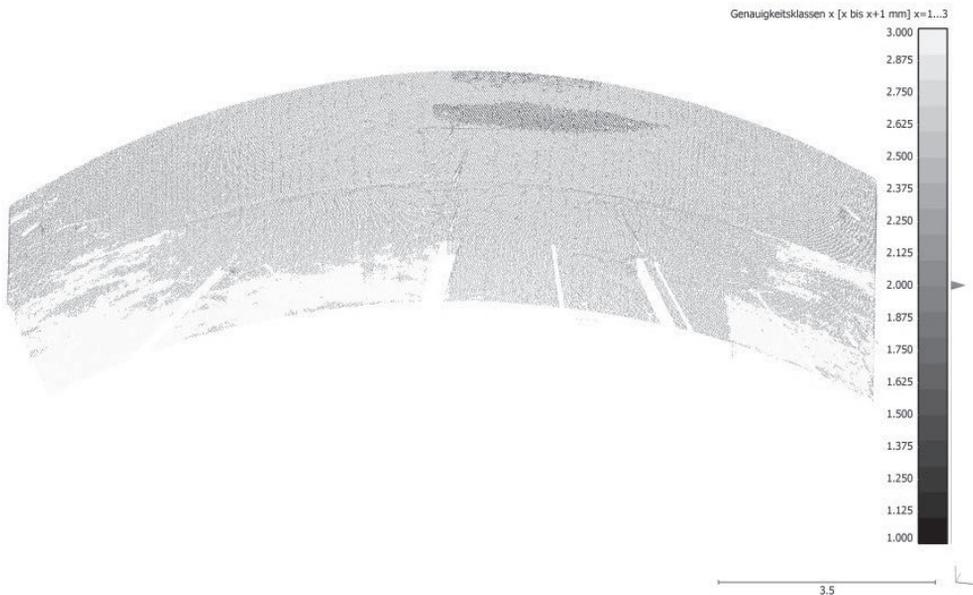


Abb. 5: Stochastische 3D-Punktwolke eingefärbt nach Genauigkeitsklassen: 1: $[0, 1[$ mm; 2: $]1, 2]$ mm; 3: $]2, \infty]$ mm für die Gewölbeunterseite. Es zeigt sich, dass der Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung sowie weite Teile des Gewölbes innerhalb der Genauigkeitsklassen 1 und 2 liegen.

2.2 Erfassung der 3D-Punktwolken

Die Erfassung der 3D-Punktwolken erfolgte mit dem Laserscanners Z+F Imager 5006 von einem stationären Standpunkt für den gesamten Belastungsversuch mit Blick von Osten in das Gewölbe (vgl. Abb. 3 für den Ausschnitt der 3D-Punktwolke). Eine allgemeine Übersicht der epochenweisen Erfassung während des Belastungsversuchs V2 findet sich in Abbildung 2. Die Erfassung der 3D-Punktwolken erfolgte zu Zeitpunkten, in denen eine konstante Last für wenige Minuten gehalten wurde. Mit den gewählten Scanparametern „high, low noise“ ergab sich eine Dauer von 7 Minuten für die 3D-Punktwolkenerfassung. E00Rw bezeichnet die Referenzeпоche mit einem Grundlastniveau von ca. 100 kN vor Versuchsbeginn. Für die erste Epoche wurde ausschließlich die Laststufe mit 1 MN erfasst. Ab der zwei-

ten Epoche wurde das unmittelbar auf die Laststufe folgende Grundlastniveau ebenfalls erfasst. Eine Übersicht aller aufbereiteten Epochen für die 3D-Punktwolken gibt Tabelle 1.

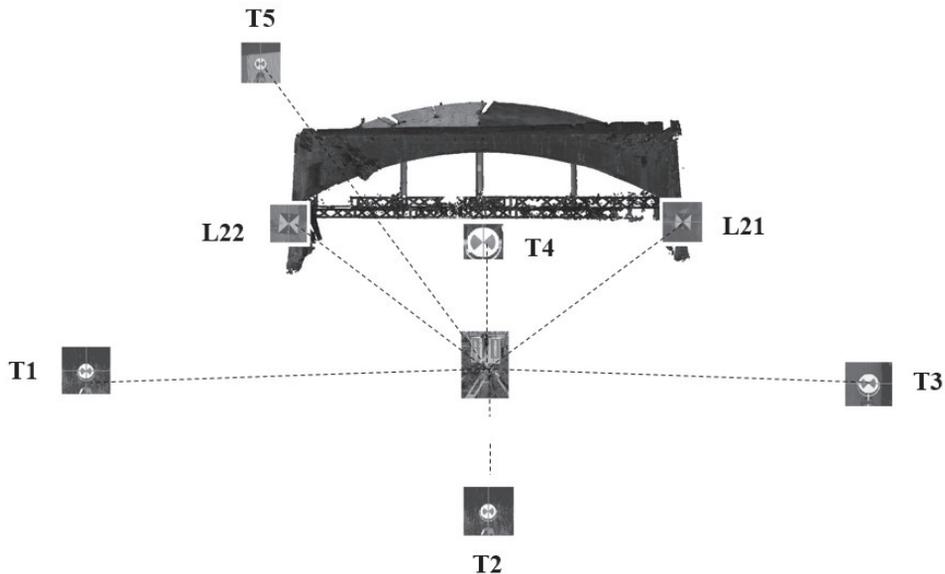


Abb. 6: Übersicht des Standpunktes und der Stabilpunkte zur Kontrolle der Standsicherheit des Laserscanners. Stabilpunkte T1-T5 signalisiert durch Tilt&Turn-Targets auf Stativen und Kontrollpunkte L21 und L22 signalisiert durch flächenhafte Zielzeichen an der östlichen Innenseite der Brückenpfeiler. Vergleiche Tabelle 1 für die Entfernungen der Zielzeichen zum Standpunkt.

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht des Standpunktes und der Stabilpunkte in Relation zum Gewölbe des Bogens 4. Die Stabilpunkte wurden durch fünf Tilt&Turn-Targets (T1-T5) auf Stativen in einer Entfernung von 6 m bis 16 m realisiert. T1-T3 befanden sich auf der östlichen Brückenseite und somit in ausreichender Entfernung zur Lasteinleitung. T4 und T5 dienten der optimalen Verteilung der Stabilpunkte über den gesamten Messhorizont. Als weitere Kontrolle des Standpunktes wurden zwei flächenhafte Zielzeichen L21 und L22 an den östlichen Innenseiten beider Brückenpfeiler (unbelasteter Teil des Tragwerks) verwendet. Die zuvor genannten Stabil- und Kontrollpunkte dienen ebenfalls als Verknüpfungspunkte zur Referenzierung der 3D-Punktwolken zum Tragwerk gelagerten Koordinatensystems, vgl. Abschnitt 1.3.

2.3 Auswertung der 3D-Punktwolken und Ableitung von Verformungen

Erster Auswertungsschritt der 3D-Punktwolken im Post-Processing war die Referenzierung der 3D-Punktwolken im Koordinatensystem des Tragwerks. Tabelle 1 zeigt das Ergebnis der Referenzierung mithilfe von Z+F LaserControl 8.9.0 und dem Modul Scantra 2.0.1.20. Die mittlere Standardabweichung der 3D-Punkte ($\bar{\sigma}_{xyz}$) liegt im Mittel bei 0,2 mm und maximal

bei 0,4 mm. Dies zeigt einerseits die Güte der Referenzierung und lässt andererseits den Schluss auf einen stabilen Laserscannerstandpunkt während des Belastungsversuchs V2 zu.

Tabelle 1: Länge der 3D-Abweichungsvektoren nach Referenzierung der 3D-Punktwolken im Koordinatensystem des Tragwerks (Angaben Z+F LaserControl 8.9.0) sowie die mittlere Standardabweichung der 3D-Punkte ($\bar{\sigma}_{xyz}$) nach der Blockausgleichung (Angabe Scantra 2.0.1.20, technet GmbH; Berlin).

Epoche/ Targets	E00Rw d [mm]	E11Lw d [mm]	E22Lw d [mm]	E22Nw d [mm]	E33Lw d [mm]	E33Nw d [mm]	E44Lw d [mm]	E44Nw d [mm]	E55Lw d [mm]	E55Nw d [mm]
L21@6m	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	0,4	0,9	0,2	1,3	0,4
L22@8m	0,2	0,3	0,4	0,2	0,7	0,2	0,9	0,4	0,9	0,6
T1@11m	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,5
T2@16m	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,4
T3@9m	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6
T4@6m	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2
T5@16m	0,1	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4	0,7	0,6	1,1	0,7
$\bar{\sigma}_{xyz}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2

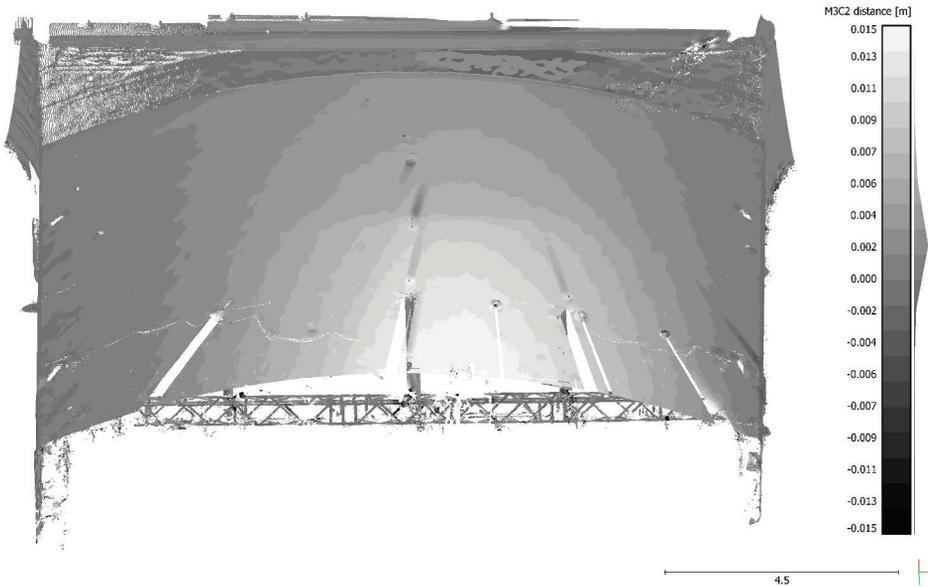


Abb. 7: 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Differenzen (M3C2) für die Epoche E55Lw mit einer aufgebrachtten Last von ca. 5 MN. Es zeigen sich Verformungen bis zu 14 mm.

Wie bereits im einleitenden Abschnitt 1.4 erwähnt, erfolgt die Ableitung der Verformungen an dieser Stelle auf Basis der 3D-Punktwolken. Es wird der Multiscale Model to Model Cloud

Comparison (M3C2) Algorithmus (LAGUE et al. 2013) unter Nutzung der Open Source Free-ware Cloud Compare (www.danielgm.net/cc) verwendet. HOLST et al. (2016) berichtet über weitere Möglichkeiten von Punktwolkenvergleichen mit Hilfe von Standardsoftware. Im Folgenden sind die aus den 3D-Punktwolken abgeleiteten Deformationen als 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke Differenzen, kurz M3C2 Differenzen bezeichnet.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die abgeleiteten Verformungen zwischen der Referenzepoche E00Rw und den Laststufen der Epochen E11 bis E55. Angegeben sind neben den maximalen M3C2 Differenzen für den Bereich im unmittelbaren Einfluss der Lasteinleitung auch die Differenzen an den Stellen der punktuellen Messungen des Lasertrackers (L8, L10, L14). Abbildung 7 zeigt die M3C2 Differenzen für E55Lw mit einer aufgebrauchten Last von 5 MN in einer 20-fach abgestuften Grauwertskala von ± 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 Osten (nach oben in Abb. 7) zum unbelasteten Teil des Tragwerks.

3 Hochgenaue und hochfrequente, diskrete Absolutdistanzmessungen zur Ableitung von Verformungen

3.1 Durchführung Lasertrackermessungen

Der Lasertracker Leica AT960-LR wurde zur Erfassung von 18 diskret durch CCR signalisierte Punkte im Gewölbebogen und an den Brückenpfeilern eingesetzt. Der Standpunkt des Lasertrackers befand sich auf einem ca. 50 cm tief gegründetem Betonfundament östlich des Gewölbebogens in unmittelbarer Nähe des Laserscanners. Die mittlere Entfernung zwischen dem Standpunkt und den CCR betrug 10 m. Zur Überprüfung der Standsicherheit dienten vier über den Horizont verteilte Stabilpunkte an den Pfeilern der neuen Allerbrücke mit einer mittleren Entfernung zum Lasertracker von 22 m. Die notwendigen atmosphärischen Parameter zur Korrektur der Absolutdistanzmessung wurden zum einen am Standpunkt des Lasertrackers und zum anderen im Bereich des Gewölbebogens erfasst. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Verteilung der 22 CCR, die sich in vier Gruppen einteilen lassen:

- (1) L1-L4: Stabilpunkte außerhalb des Einflussbereichs der Lasteinleitung zur Standsicherheitsprüfung.
- (2) L5-L7: CCR an der Messbasis der Bauingenieure, die sich horizontal vom nördlichen zum südlichen Brückenpfeiler spannte und einseitig eingespannt war.
- (3) L8-L18: CCR im Gewölbebogen: L9 und L11 im Scheitel des belasteten Bogens; L12 und L13 im Scheitel des unbelasteten Bogens; L8, L10 und L14 in der Belastungs-/Gleisachse; L15 und L16 am südlichen Brückenpfeiler; L17 und L18 am nördlichen Brückenpfeiler.
- (4) L19-L20 dienten als Kontrollpunkte an der östlichen Außenseite der Brückenpfeiler (unbelasteter Teil des Tragwerks).

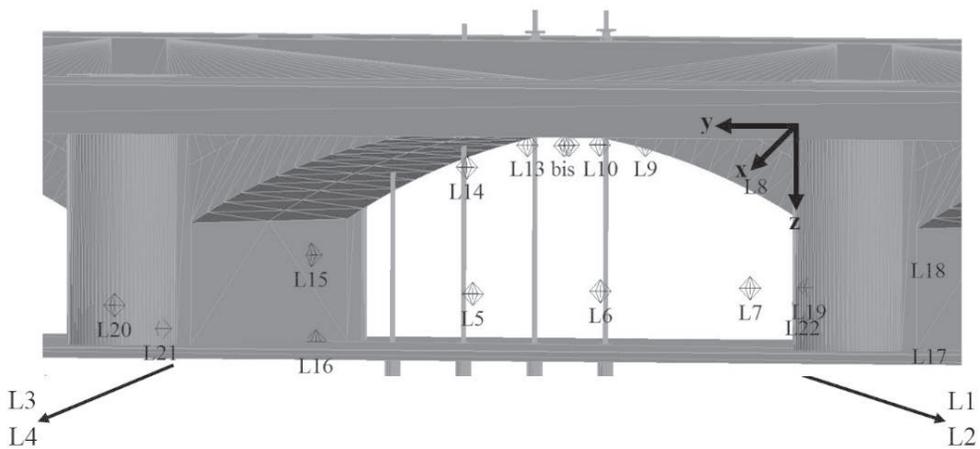


Abb. 8: Verteilung der CCR für die Lasertrackermessung: L1-L4 Stabilpunkte; L5-L7 Messbasis; L8-L18 Punkt im Gewölbebogen; L19 und L20 Kontrollpunkte an der östlichen Außenseite der Brückenpfeiler (unbelasteter Teil des Tragwerks)

Die epochenweisen Erfassung aller 22 CCR während des Belastungsversuchs V2 hat nach dem in Abbildung 2 gezeigten Belastungsregime stattgefunden. Die epochenweise einmalige, sequenzielle Erfassung mit der Software SpatialAnalyzer 2016.06.03 (New River Kinematics) erfolgte zu Zeitpunkten, in denen eine konstante Last für wenige Minuten gehalten wurde und hat ca. 2 Minuten in Anspruch genommen. Zur Automatisierung des Messablaufes wurde das Modul „*Measurement Plan*“ von SpatialAnalyzer genutzt. E00Rw bezeichnet die Referenzeпоche mit einem Grundlastniveau von ca. 100 kN vor Versuchsbeginn. Fortan wurde neben der Laststufe das unmittelbar folgende Grundlastniveau erfasst. Die zeitintensive parallele Erfassung der 3D-Punktwolken ermöglichte bis zu drei Wiederholungen pro Epoche. Zusätzlich wurde während dem Aufbringen der Last sowie beim Entlasten des Tragwerks der CCR L14 kontinuierlich mit einer Messrate von 1 Hz erfasst. Eine Übersicht aller aufbereiteten Epochen für die Lasertrackermessungen gibt Abbildung 9.

3.2 Ableitung von 3D-Verformungen aus den Lasertrackermessungen

Die Auswertung der punktuellen, hochgenauen Messungen des Lasertrackers erfolgte ebenfalls mit der Software SpatialAnalyzer (Versionen 2016.06.03 bis 2017.01.12). Unmittelbar im Anschluss an die jeweilige Epoche wurde bereits eine erste Auswertung durchgeführt, sodass vor Ort eine erste Einschätzung über die Standsicherheit des Lasertrackers erfolgen konnte. Weiterhin ermöglichte die In-situ-Auswertung den zeitnahen Vergleich insbesondere der Vertikalverformungen mit den 1D-Messungen der Bauingenieure. Die Auswertung basiert den Koordinatendifferenzen identischer Punkte beobachtet in den verschiedenen Laststufen bezogen auf die Referenzeпоche E00Rw. Diese 3D-Abweichungen entstehen für die CCR innerhalb des Gewölbebogens als Resultat der aufgebrachten Last und werden im Folgenden als 3D-Verformungen bezeichnet. Für die Stabilpunkte sind sie als 3D-Abweichungen zu interpretieren, die eine Aussage über die Stabilität des Standpunktes ermöglichen.

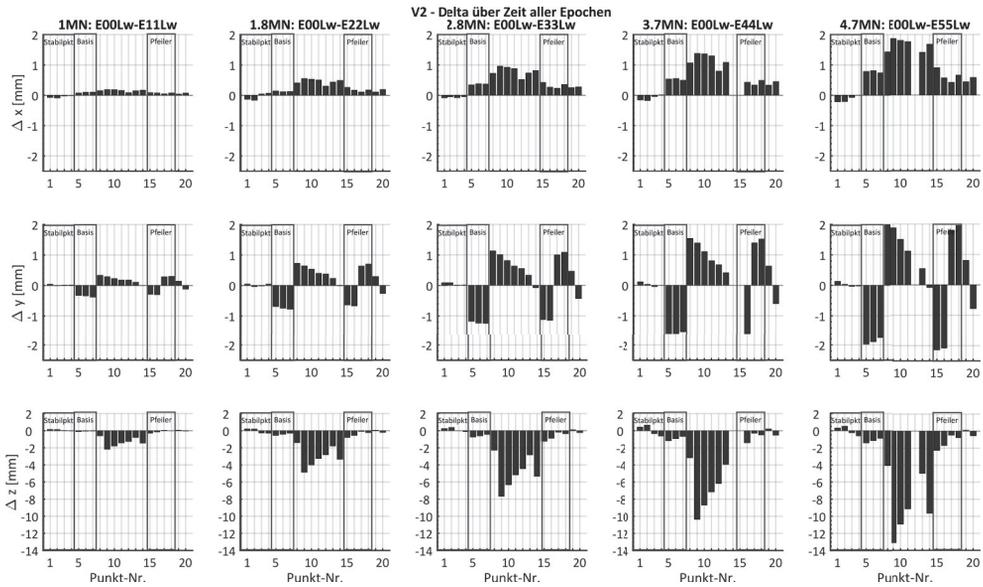


Abb. 9: Übersicht der 3D-Verformungen der CCR in Millimeter: Zeile 1: Verformungen der x-Komponente Δx quer zur Bauwerksachse; Zeile 2: Verformungen der y-Komponente Δy in Richtung der Bauwerksachse; Zeile 3: Verformungen der z-Komponente Δz entspricht unmittelbar der Vertikalverformung

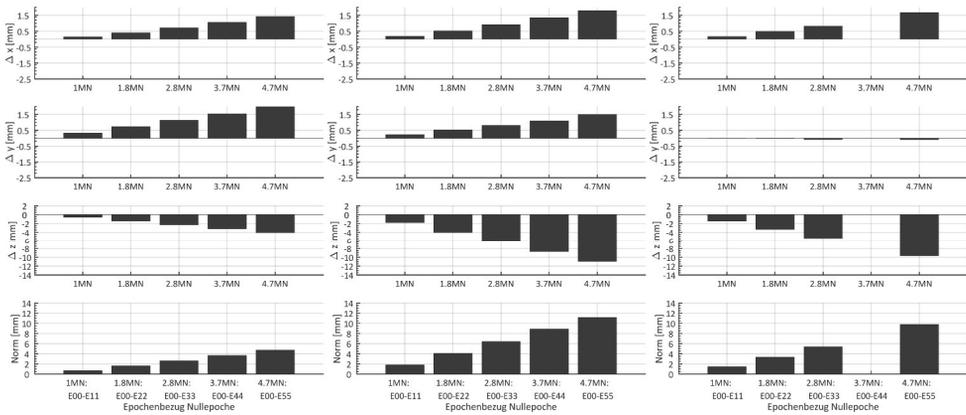


Abb. 10: Übersicht der 3D-Verformungen der CCR L8, L10 und L14 in der Belastungs-/Gleisachse (v. l. n. r) in Millimeter: Zeile 1: Verformungen der x-Komponente Δx quer zur Bauwerksachse; Zeile 2: Verformungen der y-Komponente Δy in Richtung der Bauwerksachse; Zeile 3: Verformungen der z-Komponente Δz entspricht unmittelbar der Vertikalverformung; Zeile 4 Norm der 3D-Verformung

Abbildung 9 zeigt die 3D-Verformungen getrennt nach Koordinatenkomponente über der laufenden Nummer der CCR aufgetragen, wobei die z-Komponente Δz unmittelbar der Vertikalverformung entspricht (vgl. Abb. 8 und Abschnitt 1.3 für die Definition des Koordinatensystems). Es zeigt sich deutlich, dass die Gruppe der Stabilpunkte (L1-L4) über den Zeitraum des Belastungsversuchs Werte im Bereich weniger Zehntelmillimeter aufweist und die Standsicherheit des Lasertrackers gegeben ist. Die auffallende Verformungen der Messbasis in Δy ab Epoche E22 resultieren aus der einseitigen Einspannung der Messbasis. Die Verformungen der Brückenpfeiler in Δy zeigen aufgrund der von oben aufgebracht Last in entgegengesetzte Richtungen bei vergleichbarer Größenordnung. Die übrigen CCR der Gruppe 3 zeigen die mit Lastzunahme erwartete Zunahme der Vertikalverformung. Abbildung 10 zeigt als Detailausschnitt die 3D-Verformung der CCR L8, L10 und L14 in der Gleisachse. Es zeigt sich erwartungsgemäß auf Grundlage der aufgetragenen Belastung, dass der größte Anteil der 3D-Verformung auf die Vertikalverformung entfällt und die horizontale Verformung lediglich einen Anteil von maximal 1,5 mm ausmacht. Die Vertikalverformung für L10 im Scheitel des Gewölbebogens weist mit 10,92 mm den Maximalwert bei einer Last von ca. 5 MN auf. Tabelle 2 gibt eine numerische Übersicht der Verformungen auch im Vergleich zur 3D-Punktwolke und den Vertikalverformungen der Baumesstechnik.

Tabelle 2: Verformungen zwischen der Referenzepeche E00Rw und den Laststufen der Epochen E11 bis E55 aus 3D-Punktvolken (M3C2), punktuellen, hochgenauen Messungen des Lasertrackers (L8, L10, L14) und 1D-Vertikalverformungen der Baumesstechnik (V1, V2, V3) für ausgewählte Ort in der Gleichachse

	E00Rw – E11Lw [mm]	E00Rw – E22Lw [mm]	E00Rw – E33Lw [mm]	E00Rw – E44Lw [mm]	E00Rw – E55Lw [mm]
M3C2 Differenz Maximalwert	3,00	6,00	9,00	12,00	14,00
M3C2 Differenz bei L8	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00
L8	0,58	1,40	2,27	3,16	4,10
V1	0,57	1,18	1,89	2,61	3,31
M3C2 Differenz bei L10	3,00	5,00	7,00	9,00	12,00
L10	1,80	4,00	6,31	8,69	10,92
V2	1,85	3,70	5,77	7,90	10,09
M3C2 Differenz bei L14	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00
L14	1,45	3,33	5,33	NaN	9,64
V3	1,54	3,11	4,93	6,85	8,87

4 Diskussion der optimalen flächenhaften Beschreibung von Verformungen aus 3D-Punktvolken und hochgenauen, diskreten Absolutdistanzmessungen

Zu Beginn der Diskussion einer optimalen flächenhaften Beschreibung von Verformungen aus 3D-Punktvolken und Messungen des Lasertrackers werden die erzielten Ergebnisse kritisch miteinander verglichen. Tabelle 2 gibt eine zusammenfassende Übersicht der aus 3D-Punktvolken abgeleiteten Verformungen, den aus den hochgenauen und diskreten Absolut-

distanzmessungen abgeleiteten 3D-Verformungen und den 1D-Vertikalverformungen der Baumesstechnik. Die erste Zeile in Tabelle 2 gibt den Maximalwert der M3C2 Differenz ausschließlich als Richtwert an, da dieser keiner CCR-Position direkt zugeordnet ist. Die weitere Diskussion wird auf Punktbasis geführt. Hierzu sind aus den M3C2 Differenzen Werte für den Ort der CCR L8, L10 und L14 (vgl. Abb. 6) extrahiert worden. Die Bezeichnungen der 1D-Vertikalverformungen der Baumesstechnik korrespondieren mit den Orten der CCR in aufsteigender Reihenfolge. Für den Ort des Bogenscheitels (L10, V2, fett in Tabelle 2) ergibt der Vergleich der Verformungen der geodätischen Messungen gegenüber den 1D-Vertikalverformungen der Baumesstechnik eine maximale Differenz von 1 mm für die abgeleiteten Verformungen aus den 3D-Punktwolken und eine mittlere Differenz von 0,5 mm für die Verformungen abgeleitet aus den Lasertrackermessungen. Diese Größenordnungen der Differenzen bestätigen sich für die weiteren in Tabelle 2 genannten Orte in der Gleisachse. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geodätische Messtechnik geeignet ist, die lastinduzierten Verformungen zu detektieren. Im Vergleich zu den Sensoren der Baumesstechnik ergeben sich hier Differenzen im unteren Millimeterbereich für den Laserscanner sowie im Submillimeterbereich für den Lasertracker.

Die optimale flächenhafte Beschreibung von Verformungen erfordert eine geeignete Approximation der 3D-Punktwolken des Laserscanners unter Berücksichtigung der hochgenauen, diskreten Absolutdistanzmessungen des Lasertrackers. Für die hier vorliegenden 3D-Punktwolken der Gewölbeunterseite stellt die B-Spline Approximation einen viel versprechenden Ansatz dar. Diesen und alternative flächenhafte Ansätze zur Approximation von 3D-Punktwolken beschreiben u. a. BUREICK et al. (2016). Die Herausforderungen im Rahmen der B-Spline Approximation, wie die Definition passender Flächenparameter, werden u. a. von HARMENING & NEUNER (2015) diskutiert. Die gemeinsame Auswertung der 3D-Punktwolke und der Lasertrackermessungen soll auf Basis von Epochendifferenzen erfolgen. Dies ermöglicht die Vernachlässigung des Offsets der CCR (Abstand Objektoberfläche zu CCR-Zentrum) bezogen auf die Punktwolke und führt weiterhin zu einer Reduktion des Messrauschens. Im Rahmen der eigentlichen Approximation der Differenz-3D-Punktwolke sind die diskreten Lasertrackermessungen als Stützpunkte einzuführen. Ein Auswerteansatz ist die Erweiterung geeigneter Ausgleichungsmodelle um zusätzliche Bedingungsbedingungen, sodass die Fläche explizit durch die diskreten Lasertrackermessungen verläuft. Eine alternative Vorgehensweise kann die flächenhafte Approximation auf Basis der hochgenauen, diskreten Absolutdistanzmessungen sein. Das Verhalten der Gewölbefläche zwischen den Lasertracker-Stützpunkten lässt sich aus der 3D-Punktwolke mit der höheren Varianz ableiten, sodass Informationen zum funktionalen Zusammenhang für die Approximation zwischen den Stützstellen verfügbar sind. Ein vergleichbares Vorgehen zeigen HOLST & KUHLMANN (2015) für ebenfalls punktweise gemessene Daten im Rahmen einer flächenhaften Approximationsaufgabe. Gegenstand der aktuellen Arbeiten ist die B-Spline Approximation der 3D-Punktwolke, die bereits vielversprechende Ergebnisse zeigt, sodass die Integration der aus den Lasertrackermessungen abgeleiteten Stützpunkte der nächste Schritt ist.

Literatur

- AUTORENKOLLEKTIV (2018): Belastungsversuche an der historischen Gewölbebrücke über die Aller bei Verden. In: Mauerwerkskalender (in Vorbereitung).
- BUREICK, J., NEUNER, H., HARMENING, C. & NEUMANN, I. (2016): Curve and surface approximation of 3D point clouds. In: *avn*, 123 (11-12), S. 315-327.
- Eling, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Dissertation. DGK, Reihe C, 641. München.
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2015): A constraint-based parameterization technique for B-spline surfaces. In: *Journal of Applied Geodesy*, 9 (3), S. 143-161. DOI: 10.1515/jag-2015-0003.
- HAUPT, M. & PAFFENHOLZ, J.-A. (2016): 3D-Punktwolkenbasiertes Monitoring aus Sicht eines Ingenieurbüros – Chancen und Herausforderungen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). Beiträge zum 154. DVW-Seminar am 28. und 29. November 2016 in Fulda (Schriftenreihe des DVW, 85). Wißner, Augsburg.
- HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2015): Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivellements. In: BUSCH, W. & KNOSPE, S. (Hrsg.): Tagungsband GeoMonitoring 2015; 05. – 06. März 2015, Clausthal-Zellerfeld, S. 189-206.
- HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2016): Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. In: *Journal of Applied Geodesy*, 10 (1). DOI: 10.1515/jag-2015-0025.
- HOLST, C., NOTHNAGEL, A., BLOME, M., BECKER, P., EICHBORN, M. & KUHLMANN, H. (2015): Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. In: *Journal of Applied Geodesy*, 9 (1), S. 1-14. DOI: 10.1515/jag-2014-0018.
- HOLST, C., SCHMITZ, B. & KUHLMANN, H. (2016): TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016). Beiträge zum 154. DVW-Seminar am 28. und 29. November 2016 in Fulda (Schriftenreihe des DVW, 85). Wißner, Augsburg, S. 39-58.
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, S. 10-26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
- LIEBIG, J. P., GRÜNBERG, J., PAFFENHOLZ, J.-A. & VENNEGEERTS, H. (2011): Taktile und laserbasierte Messverfahren für die messtechnische Überwachung einer Autobahnbrücke. In: *Bautechnik*, 88 (11), 749-756. DOI: 10.1002/bate.201101514.
- NEUNER, H., HOLST, C. & KUHLMANN, H. (2016): Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis. In: *avn*, 123 (11-12), S. 328-339.
- OHLMANN-BARTUSEL, J. (2009): Bestimmung flächenhafter Deformationen einer ausgebrochenen Tunnellaubung mit multitemporalen Laserscanning-Daten. In: LUHMANN, T. & MÜLLER, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. Wichmann, Heidelberg, S. 110-117.
- OHLMANN-LAUBER, J. & SCHÄFER, T. (2011): Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge. 106. DVW-Seminar (Schriftenreihe des DVW, 66). Wißner, Augsburg, S. 147-157.

- PAFFENZHOLZ, J.-A., ALKHATIB, H., STENZ, U. & NEUMANN, I. (2017): Aspekte der Qualitätssicherung von Multi-Sensor-Systemen. In: *avn*, 124 (Peer-Review akzeptierter Beitrag).
- PAFFENZHOLZ, J.-A., STENZ, U. & NEUMANN, I. (2015): Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen. In: CURBACH, M., OPITZ, H., SCHEERER, S. & HAMPEL, T. (Hrsg.): 8. Symposium Experimentelle Untersuchung von Baukonstruktionen. Dresden, 24.09.2015. Dresden (Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, 40), S. 73-80.
- SCHACHT, G., PIEHLER, J., MARX, S. & MÜLLER, J. Z. (2016): Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke. In: *Bautechnik* (Early View (Online Version of Record published before inclusion in an issue)), 6. DOI: 10.1002/bate.201600084.
- SCHMITT, A. (2014): Combining laser tracker and laser scanner data. In: KARPIK, A. P., SCHWIEGER, V., NOVITSKAYA, A. & LERKE, O. (Eds.): Integration of point- and area-wise geodetic monitoring for structures and natural objects. International Workshop. Novosibirsk, Russian Federation, 14-15 April. Institute of Engineering Geodesy, University of Stuttgart; Siberian State Academy of Geodesy, Novosibirsk, Russian Federation, S. 180-190.
- STENZ, U., PAFFENZHOLZ, J.-A., HANSEN, M., PIEHLER, J. & NEUMANN, I. (2015): Interdisziplinäre Beiträge für das Monitoring und die Sicherung von neugotischen Gewölbekonstruktionen. In: BUSCH, W. & KNOSPE, S. (Hrsg.): Tagungsband GeoMonitoring 2015. GeoMonitoring. Clausthal-Zellerfeld, 05. – 06. März 2015, S. 207-224.
- TIMMEN, A. (2016): Definition und Ableitung eines Qualitätsindex zur Visualisierung der Qualitätsparameter von 3D-Punktwolken in einer virtuellen Umgebung. Masterarbeit (unveröffentlicht). Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover.
- WUJANZ, D. (2016): Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring. Dissertation, DGK Reihe C, 775. München.
- WUNDERLICH, T., NIEMEIER, W., WUJANZ, D., HOLST, C., NEITZEL, F. & KUHLMANN, H. (2016): Areal deformation analysis from TLS point clouds – the challenge. In: *avn*, 123 (11-12), S. 340-351.
- YANG, H., OMIDALIZARANDI, M., XU, X. & NEUMANN, I. (2016): Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures. In: *Composite Structures* (In Press, Corrected Proof). DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.095.