

# Kinematisches Laserscanning zur statischen Bewertung großer Brückenbauwerke

CHRISTIAN HESSE, NIKLAS LUKA KRAUSE, MATTHIAS FRENZ, INGO NEUMANN,  
FREDERIC HAKE & JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ

Die Norderelbbrücke aus dem Baujahr 1963 überführt als östliche Hamburger Elbquerung die Bundesautobahn 1 über die namensgebende Norderelbe und liegt direkt zwischen den beiden Autobahndreiecken Hamburg-Süd und Hamburg-Südost. Für den Schwerverkehr liegt die Brücke sowohl auf einer Zufahrtsroute des Hamburger Hafens als auch für den Skandinavien Verkehr über die Fährhäfen und Brücken der Ostsee und ist somit von herausragender Bedeutung für den Fernverkehr. Nachdem in den 2010er Jahren erste Schäden in Form von Ermüdungsrissen aufgetreten sind, wurden Nachrechnungen und Bauwerksprüfungen durchgeführt. In diesem Zuge wurde festgestellt, dass eine der Realität möglichst genau entsprechende rechnerische Tragwerksmodellierung von hoher Wichtigkeit ist, um die aufgetretenen Schäden bewerten und kritische Punkte im Tragwerk sicher bestimmen zu können. Hierfür bietet ein Vergleich zwischen Messung und Rechnung der Tragwerksverformungen unter definierten Lasten eine gute Möglichkeit für eine Verifikation und Kalibrierung von Rechenmodellen. Im vorliegenden Fall konnten die Überfahrten von außergewöhnlichen Schwertransporten mit definierten Lasten genutzt werden. Für die messtechnische Erfassung der Tragwerksverformungen kam ein innovatives kinematisches Laserscanning zum Einsatz. Das prinzipielle Vorgehen zur Messdatenerfassung und die Ergebnisse des Vergleichs werden im vorliegenden Artikel beschrieben.

## 1. Anlass

Das Bestandsbauwerk wurde als 5-feldrige Schrägseilbrücke in Stahlbauweise mit zwei Pylonen und einer harfenförmigen Seilabspannung erbaut. Es wurde sowohl kurz nach Fertigstellung als auch in den 1980er Jahren mehrfach umgebaut sowie verstärkt und weist, insbesondere auch durch die schon durchgeführten Verstärkungsmaßnahmen, ein hochkomplexes Tragverhalten auf.

In den 2010er Jahren traten an den Windverbänden der Brücke Schäden in Form von Ermüdungsrissen auf, die saniert wurden. Die Brücke wurde nachfolgend gemäß der 2011 erschienenen „Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“ (Nachrechnungsrichtlinie) (BMVI 2011) nachgerechnet. Der seit der Erbauung der Brücke massiv gewachsene Schwerverkehrsanteil am Verkehrsaufkommen führt als ein Teilergebnis der Nachrechnung nun zu rechnerischen Ergebnissen, die teilweise nicht vollumfänglich dem normativ geforderten Sicherheitsniveau entsprechen. Im Jahr 2017 wurde die DEGES mit der Planung für einen Ersatzneubau im Zuge des 8-streifigen Ausbaues der A1 beauftragt und im Jahr 2019 wurde ein entsprechender Realisierungswettbewerb durchgeführt.



**Abbildung 1:** Norderelbbrücke (links: Perspektive, rechts: Untersicht während einer Bauwerksprüfung)

Durch die dennoch zu erwartende lange Dauer bis zur Fertigstellung des Ersatzneubaus, muss das Bestandsbauwerk demnach noch über einen längeren Zeitraum verkehrssicher betrieben werden.

Zusätzlich wurden im Rahmen von kurzfristig durchgeführten Bauwerksprüfungen neben Korrosionsschäden auch weitere Ermüdungsrisse an Schweißnähten entdeckt. Teilweise ähnliche Risse wurden auch an vergleichbaren Großbrücken festgestellt (PASCHEN, M. ET AL. 2017b). Es ist nun erforderlich, die Schäden mit ausreichender Sicherheit hinsichtlich der Notwendigkeit von erforderlichen Sanierungsmaßnahmen zu bewerten. Hierfür muss bekannt sein, ob die Schäden an für die Standsicherheit des Tragwerks vitalen Punkten liegen (HENSEN, W. 1992) und somit eine lokale Sanierung bzw. Ertüchtigung erfordern, oder ob es ausreicht, die nun bekannten Schäden im Rahmen eines geeigneten Bauwerksmonitorings in Verbindung mit regelmäßigen Bauwerksprüfungen lediglich zu beobachten. Das im Rahmen der bautechnischen Prüfung der Nachrechnung erstellte und für diesen Zweck auch ausreichend genaue Finite-Elemente-Stabwerksmodell wurde hierfür von tragwerksplanerischer Seite durch ein Finite-Elemente-Schalenmodell des Bauwerks ergänzt. Im Rahmen des Vergleichs zwischen Messung und den beiden Rechenmodellen soll ein der Realität hinsichtlich der durch Lasten auftretenden Verformungen weitgehend entsprechendes Tragwerksmodell entwickelt werden.

## 2. Schwerlasttransport

Das Bauwerk ist eine der wenigen Zufahrten für die sog. Großraum- und Schwertransporte (GST) in den Hamburger Hafen. Einer der schwersten Transporte der jüngeren Geschichte des Bauwerkes war der Transport eines ca. 117 t schweren Schiffspropellers. Eine solche Überfahrt stellt eine besondere Belastung des Bauwerkes dar. Das Spezialfahrzeug der Spedition hat die Brücke hierbei mit einem Gesamtgewicht von 184 t überquert. Um diese Überfahrt überhaupt zu ermöglichen, musste das Bauwerk als Ergebnis einer eigens durchgeführten Nachrechnung für den gesamten übrigen Verkehr in beiden Richtungen gesperrt werden und der Transport einer vorgegebenen Spur mit Schritttempo folgen. Durch den Landesbetrieb Straßen Brücken und Gewässer (LSBG) wurde die Überfahrt durch umfangreiche Vermessungsarbeiten begleitet.



Abbildung 2: Schwerlasttransport eines Schiffspropellers als definierter Lastfall

### 3. Bauwerksbeschreibung

Die Norderelbbrücke hat eine Länge von 411 m, eine Spannweite in der Hauptöffnung von 172 m und die Gesamtbreite beträgt 30,74 m. Der Querschnitt besteht aus 4 Hauptträgern der Höhe  $h = 3,0$  m im Abstand von 7,80 m, die über Querschreiben und Querträger zu einem Trägerrost verbunden sind. Die beiden Pylone stehen auf Strompfeilern, welche als ausbetonierte Senkkästen im Flussbett der Norderelbe gegründet wurden. Das westliche Widerlager ist auf Pfähle gegründet, das östliche Widerlager ist flach gegründet. Der Festpunkt der Brücke befindet sich am östlichen Pylon. In Längsrichtung ist die Brücke gelenkig gelagert, in Querrichtung spannt sich der Pylon über einen Rahmen in die seitlichen Stabilisierungsstützen ein.

Die Fahrbahn ist als orthotrope Platte mit 8 cm Asphaltbelag ausgeführt. Die mittleren Hauptträger sind in der Hauptöffnung über ein Bodenblech zu einem Hohlkastenquerschnitt verbunden. Zur weiteren Erhöhung der Torsionssteifigkeit sind in den Seitenfeldern zwischen den Untergurten der mittleren Hauptträger Verbände angeordnet. Das Längssystem teilt sich in fünf Felder (31 m + 64 m + 172 m + 64 m + 80 m) auf. Die Pylone der Brücke sind in den Überbau eingespannt. Das Bauwerk wurde für die Brückenklasse 60 ausgelegt. Im Zuge von Instandsetzungsmaßnahmen 1984ff. wurde das Lastniveau auf BK 60/30 erhöht.

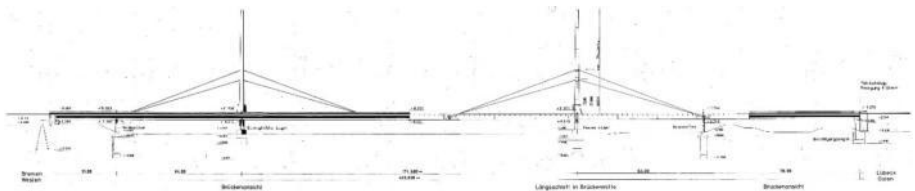


Abbildung 3: Brückenansicht mit Seilführung im Ursprungszustand 1963

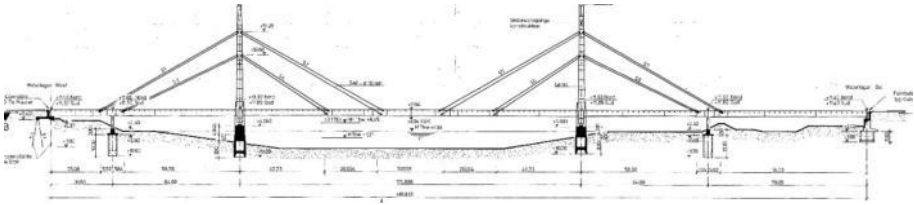


Abbildung 4: Brückenansicht mit Seilführung nach dem Umbau 1984ff

Dabei wurde der Standstreifen zu einer vollen Fahrspur umfunktioniert. Signifikante Systemänderungen waren die stärker geneigte Seilabspannung mit einem vollständigen Ersatz der Pylone und veränderten Seilaufhängungen sowie die zusätzlichen Verbände in der Hauptöffnung zwischen den Untergerüten der äußeren und inneren Hauptträger.

#### 4. Messtechnische Erfassung mehrerer Schwertransportüberfahrten

Für die Bestimmung des Deformationsverhaltens der Brücke wurden bislang zwei Schwertransportepochen genutzt, in denen während nächtlicher Überfahrten mehrere Schwertransporte die Brücke passierten.

Die Messaufgabe bestand hierbei in der Erfassung der vertikalen Deformationen entlang der Längsträger (Untergerüte) mit hoher Frequenz und Punktauflösung, um die während der Überfahrt des Schwertransportes auftretenden Höhenänderungen möglichst vollständig und zeitlich präzise referenzierbar zu erfassen. Sensorische Möglichkeiten zur Erfassung von Brückenbewegungen mittels MEMS und IATS-Sensoren (Image-Assisted-Total-Station) wurden bereits in [OMIDALIZARANDI, M. ET AL. \(2019\)](#) vorgestellt.

Die Trajektorie des Zugfahrzeugs des Schwertransportes wurde während der gesamten Überfahrt mittels eines GNSS-Receivers durch den Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) bestimmt, so dass im Anschluss ein Vergleich der eingebrachten Lasten mit den lokal entlang der Längsachse auftretenden Deformationen erfolgen konnte. Aufgrund der Anforderungen an Punktauflösung und Messrate wurden unterhalb der vier Untergerüte jeweils ein 3D-Laserscanner vom Typ Zoller+Fröhlich IMAGER (5010 und 5016) installiert, der über ein speziell entwickeltes Modul mit der GPS-Zeit synchronisiert wurde. Die 3D-Laserscanner wurden jeweils im Profilmodus betrieben, so dass wiederholt 2D-Profile mit Wiederholraten von bis zu 50 Hz aufgezeichnet wurden. Für Details zum Einsatz eines 3D-Laserscanners im Profilmodus siehe [KUTTERER, H. ET AL. \(2009\)](#). Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung von Laserscannern ist das berührungslose Messverfahren zur unmittelbaren hochfrequenten 3D-Koordinatenbestimmung, durch welches auf Installationen am Bauwerk vollständig verzichtet werden kann.

Voraussetzung für die spätere räumliche Zuordnung der, zwar über gleichmäßige Winkelschritte allerdings in unterschiedlichen Epochen mehr oder weniger zufällig, absolut

platzierten Messpunkten des Laserscanners ist die Diskretisierung beziehungsweise Interpolation an identischen Punkten am Bauwerk. Zudem ist die möglichst genaue Ausrichtung und Positionierung der Laserscanner in Bezug zum Bauwerkskoordinatensystem erforderlich.

Vergleichbare Messungen erfolgten bereits mittels Laserscannern an Schleusen, an Türmen von Windenergieanlagen (HESSE, C. ET AL. 2005; KUTTERER, H. & HESSE, C. 2006) sowie an Brückenbauwerken (SCHILL, F. & EICHHORN, A. 2019; WUJANZ, D. ET AL. 2018).

Die Abbildung 5 zeigt alle vier bereits ausgerichteten Laserscanner unterhalb der Brücke, die den Längsträger mit einer Messrate von 50 Hz erfassen.



**Abbildung 5:** Position der vier Profils Scanner unterhalb des Brückenfeldes 1

Die Steuerung der Laserscanner sowie des Synchronisationsmoduls erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover von einem zentralen Arbeitsplatz aus, um eine kontinuierliche Erfassung und gleichbleibende Qualität der Messdaten zu gewährleisten. Von hieraus wurden alle Laserscanner parametrisiert, gestartet sowie die Anzahl der erfassten Profile während der Überfahrt kontrolliert (Abbildung 6).

Parallel zur Erfassung mittels Laserscanner wurde durch den LGV ein tachymetrisches Tracking von diskreten Punkten an den statisch relevanten Stellen des Brückenfeldes (Viertelpunkte und Brückenmitte) durchgeführt.

Durch das Büro dhp:i wurden während der ersten Messepoche zudem hochpräzise Invar-Draht-extensometer in den Viertelpunkten sowie der Brückenmitte über alle Achsen installiert, mit deren Hilfe eine unabhängige Evaluation der Laserscannermessungen erfolgte.



Abbildung 6: Steuerstand für die Datenerfassung

Der grundsätzliche Ablauf der Auswertung ist in Abbildung 7 dargestellt. Neben der Einmessung der Laserscannerstandpunkte in das Bauwerkskoordinatensystem wurden zum einen die Rohdaten der Laserscanner auf den Sensoren selbst gespeichert, zum anderen auf dem Synchronisierungsmodul, die von den Laserscannern erzeugten Synchronisierungspulse. Die Rohdaten wurden in ein mittels MATLAB lesbares Format konvertiert, die Synchronisierungsdaten von überzähligen Pulsen befreit.

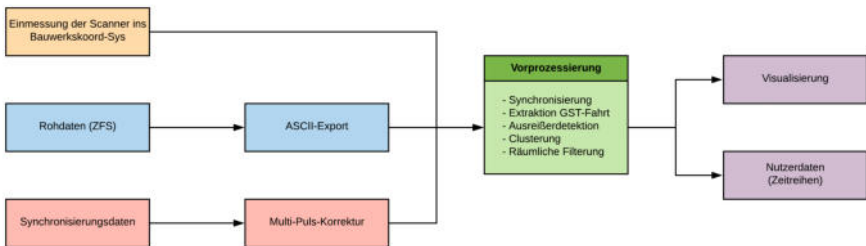
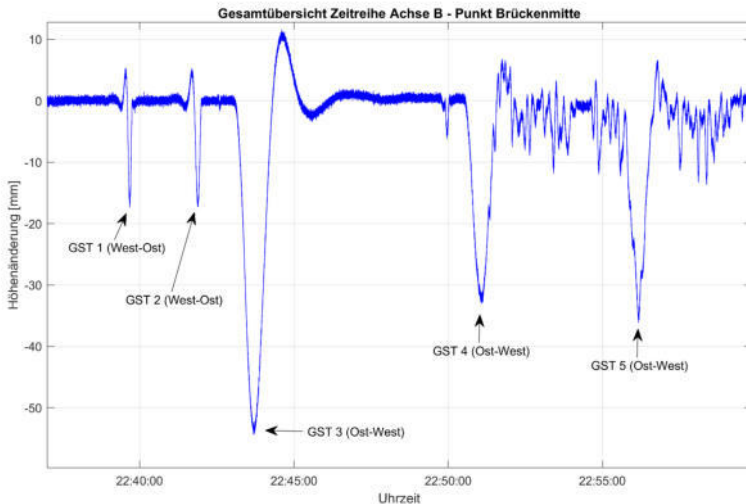


Abbildung 7: Datenfluss und Workflow der Datenauswertung

Einen ersten Einblick in die Rohdaten zeigt Abbildung 8, in der die Zeitreihe der Vertikalbewegung des Brückenmittelpunktes über mehrere Großraum- und Schwertransportüberfahrten (GST) an diesem Abend in beide Fahrrichtungen zu sehen ist.



**Abbildung 8:** Deformation des Feldmittelpunktes auf der Achse B

Bis zum Zeitstempel 22:50 Uhr ist die Norderelbbrücke beidseitig für den gesamten Verkehr gesperrt. Es fahren zunächst zwei kleinere Schwertransporte von der westlichen zur östlichen Seite, im Anschluss daran quert der Haupt-Schwertransport die Brücke in Richtung Westen. Sehr gut zu erkennen ist die Tatsache, dass alle Schwertransporte nicht nur eine Senkung der Brücke hervorrufen sondern bedingt durch die Bauweise als mehrfeldrige Schrägseilbrücke nach passieren des ersten Brückenfeldes auch eine Anhebung in einer Größenordnung von 10 mm erfolgt, als der Schwertransport in das anschließende Brückenfeld fährt.

Nach Passieren des Haupt-Schwertransportes wurde die Gegenfahrbahn wieder durch die Polizei freigegeben, was an den deutlich erhöhten Schwingungen durch PKW und zahlreiche LKW in Abbildung 8 zu erkennen ist.

Für die Bewertung der Deformationen wurden die unterhalb der Längsträger des Feldes 1 gescannten Punkte in Klassen mit einer Länge von 50 cm unterteilt (vgl. Abbildung 9). Innerhalb dieser Klassen wurden alle Punkte in vertikaler Z-Richtung (Höhe in Abbildung 9) gefiltert, so dass je Epoche eine Diskretisierung der vorhandenen Deformationen erfolgte. So wurden entlang der Längsachse etwa 100 Messpunkte über eine Länge von 50 m und einer Messrate von 50 Hz bestimmt.

Betrachtet man nun die Deformationen aller Längsträger in Höhe der Feldmitte (PBrückenmitte in Abbildung 9) während der Überfahrt des vom Gewicht her schwersten Transportes (GST3), so ergibt sich das in Abbildung 10 dargestellte Verhalten.

Im Vergleich der einzelnen Messpunkte über die mittleren Querschnitt zeigt sich auch sehr anschaulich die Torsion des Überbaus aus der Differenz der Höhenänderungen zwischen

der hauptsächlich deformierten Achse A, in deren Nähe der Transport über die Brücke fuhr und der vergleichsweise wenig veränderten Achse D, welche sich unter der gesperrten Gegenfahrbahn befindet.

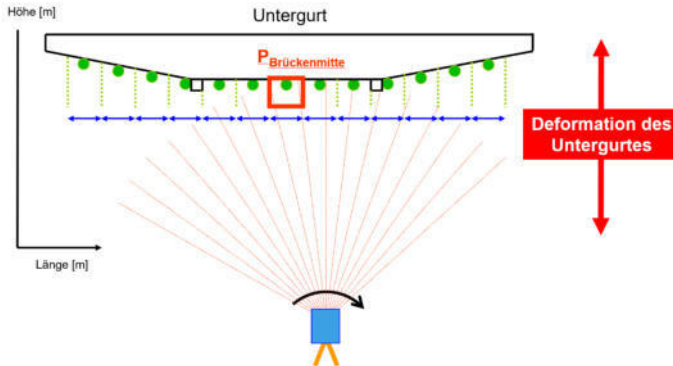


Abbildung 9: Diskretisierung der Deformation entlang der Längsträger

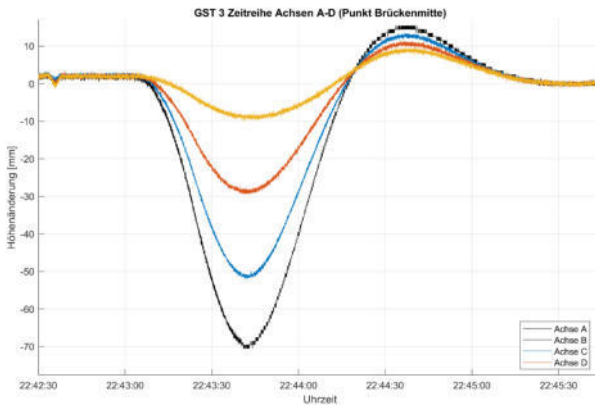


Abbildung 10: Zeitreihendarstellung der Überfahrt GST3 in allen Längsträgern

Die erzielbare Messgenauigkeit liegt hier – nach räumlicher Filterung innerhalb des 50 cm Clusters – im Millimeterbereich. Entlang der Achsen hin zu den Widerlagern erhöht sich das Messrauschen in erster Linie durch die zum Teil sehr flachen Auftreffwinkel des Laserstrahls zum Teil erheblich, bleibt aber im einstelligen Millimeterbereich.



Die Synchronisierung der einzelnen Laserscanner gelingt mit der für GNSS üblichen Genauigkeit, ein kleinerer Faktor sind Multi-Pulse der Laserscanner, die von Gerät zu Gerät unterschiedlich sind, sich aber in einer Größenordnung von 2-3 Pulsen, entsprechend 40-60 Millisekunden bewegen. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit des Schwertransportes von etwas mehr als 1 m/s liegt die Synchronisierung allerdings in einer sehr guten Größenordnung. Die vollständig prozessierten Zeitreihen aller Cluster während der Überfahrten der wesentlichen Schwertransporte wurden anschließend an das Büro pantan:ingenieure für die weitere statische Beurteilung übergeben.

Zudem wurden verschiedene Visualisierungen für die Präsentation beim Auftraggeber erstellt, um die Deformationen zusammen mit der Position des Schwertransportes in visueller Form bewerten zu können.

## 5. Vergleich Tragwerksabbildungen Stabwerksmodell und Schalenmodell

Die Wahl einer zutreffenden ingenieurmäßigen Modellbildung im Zuge der Berechnung bzw. Nachrechnung komplexer bestehender Tragwerke, insbesondere von Ingenieurbauwerken, stellt eine maßgebende Aufgabe im Rahmen der technischen Bearbeitung dar.

Stabwerksmodelle haben hier u.a. den prinzipiellen Vorteil, dass die Schnittkräfte im Tragwerk, auf denen in der Regel die Nachweise der Standsicherheit und Ermüdungssicherheit basieren, direkt ablesbar und somit mit der Bestandsstatik vergleichbar sind. Zudem können Querschnittsänderungen leicht erfasst werden und die erforderlichen Nachweise oftmals direkt geführt werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich auch komplexe Bauabläufe relativ einfach und in der Regel ingenieurmäßig nachvollziehbar abbilden lassen. Nachteilig ist aber, dass z. B. die mitwirkenden Breiten von Platten bei Trägerrosten nur vereinfacht normativ erfasst werden können.

Schalentragwerke können dahingegen, abhängig von der Genauigkeit der gewählten Modellbildung, realitätsnäher sein und ggf. Effekte wie Torsionstragwirkungen und Querverteilungen zutreffender abbilden. Mitwirkende Breiten von Platten müssen nicht gesondert berücksichtigt werden. Dem gegenüber steht ein höherer Aufwand bei der Modellbildung als bei einem Stabwerk.

Die Norderelbbrücke wurde im Zuge der durchgeführten technischen Bearbeitungen als Stabwerk modelliert, wobei die 4 Hauptträger über Querscheiben und Querträger zu einem Trägerrost verbunden sind. Der Querschnitt wird in seinem Schwerpunkt am Stab angeordnet. Das System wirkt zwar optisch „nicht sauber“ (die graphische 3D-Darstellung zeigt keine ebene Fahrbahn, siehe Abbildung 11, oben), der Schwerpunkt der Stäbe liegt jedoch in einer Flucht. Somit entstehen keine ungewollten Torsionsmomente oder schiefwinklige Verformungen infolge freier Lasten bzw. sonstiger Lasten.

GENSICHEN, V. & LUMPE, G.(2008) merken zutreffend an, dass die Zuverlässigkeit bzw. Anwendbarkeit der im verwendeten Berechnungsprogramm implementierten geometrischen nichtlinearen Theorien überprüft werden sollten. Darüber hinaus lässt sich im Stabwerksmodell ausschließlich die St. Venant'sche Torsion erfassen. Die Berücksichti-

gung einer eventuellen Wölbkrafttorsion ist nur am Schalenmodell möglich. Um daher die globale Tragwirkung des Bauwerks abzusichern und die Abbildung als Stabwerk verifizieren zu können, wurde für das Gesamtsystem zusätzlich eine orientierende Untersuchung an einem globalen Schalenmodell (Abbildung 11, unten) durchgeführt.

Die Ergebnisse aus der Stabwerksbemessung und somit auch der Ursprungsstatik und der Nachrechnung können demnach grundsätzlich schon aufgrund der größtenteils guten Übereinstimmung der globalen Schnittkräfte verifiziert werden, auch wenn das Stabwerksmodell die tatsächliche Tragwirkung teilweise, insbesondere hinsichtlich der Torsionstragwirkung, nicht vollumfänglich abbilden kann. Inwieweit dies durch das Schalenmodell aber realitätsnäher möglich ist, kann durch den reinen Vergleich zweier Rechenmodelle nicht bestimmt werden.

Eine Bewertung der Ergebnisse der Sonderprüfung, hier insbesondere der Auswirkungen der im Rahmen der Sonderprüfungen festgestellten Schäden, erfordert aber die genaue Kenntnis der Tragwirkung des Bauwerks.

Insbesondere die zuverlässige Bestimmung von kritischen Punkten an für die Standsicherheit vitalen Bauteilen (KUTTERER, H. & HESSE, C.2006) und die Bestimmung selbiger ist für eine Maßnahmenplanung unerlässlich.

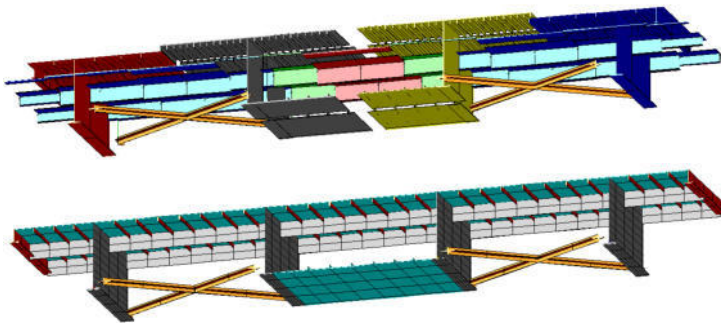


Abbildung 11: Brückenquerschnitte aus Stabwerksmodell (oben) und kalibriertem Schalenmodell (unten)

## 6. Kalibrierung Tragwerksmodell und Ergebnisse

Die Messergebnisse wurden daher mit dem Stabwerksmodell und dem Schalenmodell verglichen. Dabei wurde wie schon bei den ersten rechnerischen Vergleichen zwischen den beiden Modellen festgestellt, dass die Querverteilung und die Torsionstragwirkung anhand des Schalenmodells besser abgebildet werden können. Insbesondere zeigt sich dies am großen Mittelfeld. Hier wird der Verlauf der Gradienten in Querrichtung durch das Schalenmodell infolge der Belastung besser erfasst, wengleich die Größe der Verformung noch nicht vollumfänglich richtig abgebildet war, siehe Abbildung 12, untere Kurvenschar.

Es wurden daraufhin diverse Anpassungen und Verfeinerungen des Schalenmodells vor-

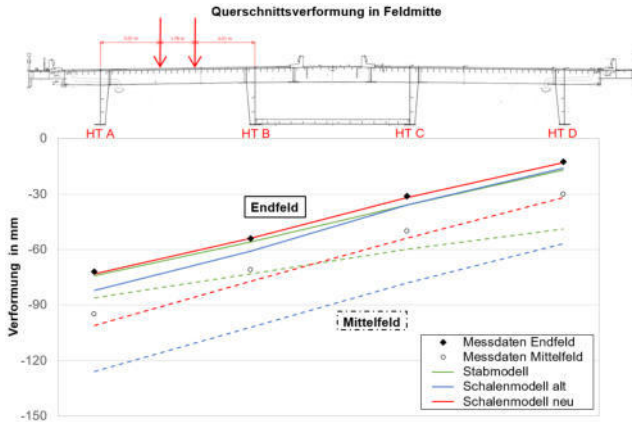


Abbildung 12: Vergleich Querschnittsverformungen

genommen und auch untergeordnete Bauteile sowie Steifen insbesondere an den Lasteinleitungspunkten der Seile mit erfasst, die im ersten Schritt der vereinfachten Schalenmodellierung nicht berücksichtigt wurden. Die auf dieser Basis durchgeführten Verformungsberechnungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung in Feldmitte, siehe Abbildung 13.

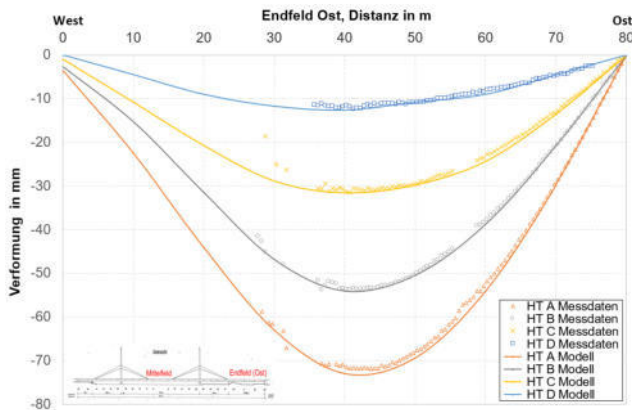


Abbildung 13: Verformungsvergleich Hauptträger (HT) A bis D zw. Messung und kalibriertem Schalenmodell

Ebenso verhält es sich mit den Ergebnissen in Brückenlängsrichtung. In Abbildung 13 wird die gute Übereinstimmung der Verformungen im Endfeld Ost in Längsrichtung zwischen

Messung und Rechnung am kalibrierten Schalenmodell für alle vier Längsträger gezeigt. Dank der innovativen Messtechnik mit kontinuierlich über die halbe Bauwerkslänge vorhandenen Datenpunkten sind die Ergebnisse des Vergleichs als zuverlässig einzustufen. Somit kann das kalibrierte Schalenmodell im Weiteren als maßgeblicher Teil der Grundlagen für eine Bewertung des geschädigten Tragwerks genutzt werden. Insbesondere Einwirkungen, die einen hohen Torsionsanteil haben (Ermüdungslastmodell LM3, Schwertransporte, etc.) werden hiermit besser erfasst.

## 7. Zusammenfassung

Die Norderelbbrücke überführt als östliche Hamburger Elbquerung die Bundesautobahn 1 über die namensgebende Norderelbe und ist von herausragender Bedeutung für den Fernverkehr. Nachdem erste Schäden festgestellt und eine Nachrechnung durchgeführt wurde, musste für eine sichere Bewertung der Schäden ein exaktes rechnerisches Tragwerksmodell des Bauwerks erstellt werden. Grundlage hierfür war der Vergleich zwischen messtechnisch erfassten Verformungen am Haupttragwerk mit rechnerischen Ergebnissen. Als Belastung konnten die Überfahrten von außergewöhnlichen Schwertransporten genutzt werden. Dank der hohen Genauigkeit und Güte der messtechnisch erfassten Verformungen konnte ein kalibriertes Schalenmodell erstellt werden. Dieses wird im Weiteren für die Bewertung des geschädigten Tragwerks genutzt.

Das Bauwerk wird durch den LSBG weiterhin überwacht, um die Betriebssicherheit bei einem größtmöglichen Verkehrswert zu gewährleisten und eine Sperrung des Bauwerks für den Schwerverkehr, wie bei verschiedenen Rheinbrücken geschehen (GENSICHEN, V. & LUMPE, G. 2008; HENSEN, W. 1992), zu verhindern. Die Auswertung der Messergebnisse ergänzen hier die Informationen aus den regelmäßigen Bauwerksprüfungen zu einem umfassenden Bild des aktuellen Bauwerkszustandes und ermöglichen einen sicheren Betrieb des Bauwerkes. Die besonders gute Zusammenarbeit zwischen Vorhabenträger (LSBG), messtechnischer Begleitung (dhp:i, GIH) sowie bautechnischer Prüfung der Nachrechnung, tragwerksplanerischer Bearbeitung und objektbezogener Schadensanalyse (panta ingenieure) hat den vorliegenden Artikel erst ermöglicht und ist an dieser Stelle hervorzuheben. Den beteiligten Firmen und Personen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

## Literatur

BMVI (HRSG.) (2011): Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand.

GENSICHEN, V. & LUMPE, G. (2008): zur Leistungsfähigkeit, korrekten Anwendung und Kontrolle von EDV-Programmen für die Berechnung räumlicher Stabwerke im Stahlbau (Teil 1). In: Stahlbau 77 (6), S. 447-453.

HENSEN, W. (1992): Grundlagen für die Beurteilung der Weiterverwendung alter Stahlbrücken. Dissertation, D 82 im Rahmen der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Stahlbau der RWTH Aachen.

HESSE, C.; NEUNER, H.; KUTTERER, H. (2005): Statistical Analysis of Kinematic Laser Scans. In: Grün, A. und Kahmen, H. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VII, II. Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. Vienna, S. 103-112.

- KUTTERER, H. & HESSE, C. (2006): Hochauflösende Erfassung schneller Bauwerksbewegungen mit kinematischem Laserscanning. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). DVW-Schriftenreihe, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 147-158.
- KUTTERER, H.; PAFFENHOLZ, J.-A.; VENNEGEERTS, H. (2009): Kinematisches terrestrisches Laserscanning. In: zfv 134 (2), S. 79-87.
- OMIDALIZARANDI, M.; NEUMANN, I.; KEMKES, E.; KARGOLL, B.; DIENER, D.; RÜFFER, J.; PAFFENHOLZ, J.-A. (2019): MEMS based Bridge Monitoring Supported by Image-Assisted Total Station, In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, 833-842.
- PASCHEN, M.; HENSEN, W.; HAMME, M. (2017a): Instandsetzungs- und Sicherungsmaßnahmen bei den Rheinbrücken Leverkusen und Duisburg-Neuenkamp – ein Zwischenbericht (Teil 1). In: Stahlbau 86 (7), S. 603-618.
- PASCHEN, M.; HENSEN, W.; HAMME, M. (2017b): Instandsetzungs- und Sicherungsmaßnahmen bei den Rheinbrücken Leverkusen und Duisburg-Neuenkamp – ein Zwischenbericht (Teil 2). In: Stahlbau 86 (12), S. 1113-1119.
- SCHILL, F. & EICHHORN, A. (2019): Deformation Monitoring of Railway Bridges with a Profile Laser Scanner. In: zfv , 144 (2), S. 109-118.
- WUJANZ, D.; BURGER, M.; NEITZEL, F.; LICHTENBERGER, R.; SCHILL, F.; EICHHORN, A.; STENZ, U.; NEUMANN, I.; PAFFENHOLZ, J.-A. (2018): Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung. In: Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 2018, Ernst & Sohn: Berlin, S. 221-239, doi: 10.1002/9783433608050.ch10.

## Kontakt

CHRISTIAN HESSE

Dr. Hesse und Partner Ingenieure  
Veritaskai 6  
21079 Hamburg

NIKLAS LUKA KRAUSE

Freie und Hansestadt Hamburg  
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer  
Sachsenfeld 3-5  
20097 Hamburg

MATTHIAS FRENZ

panta ingenieure GmbH  
Bugenhagenstraße 5  
20095 Hamburg

INGO NEUMANN

FREDERIC HAKE

Leibniz Universität Hannover  
Geodätisches Institut  
Nienburger Str. 1  
30167 Hannover

JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ

TU Clausthal  
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen  
Erzstraße 18  
38678 Clausthal-Zellerfeld