



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**10. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

11. März 2019

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

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-3 65 68
Fax: +49 351 463-3 72 89

Titelbild:

Belastungsrahmen für die Prüfung von Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus
Görlitz (Foto: Oliver Mosig, s. Beitrag Mosig et al. in diesem Tagungsband)

Redaktion und Layout: Silke Scheerer
Korrekturen: Petra Kahle, Angela Heller
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel
Für die Inhalte der Beiträge sind die Autor*innen verantwortlich.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, März 2019

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau verfügbar (<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/das-institut/veranstaltungen/SEUB>).

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-583-4

Inhalt

Vorwort	7
Steffen Marx, Jürgen Grünberg, Gregor Schacht Sicherheitskonzept für Belastungsversuche	9
Mai Häßler Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen	23
Thilo Fröhlich, Veit Birtel, Dieter Lotze Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung	33
Oliver Mosig, Sabine Wellner, Jörg Rudolph Belastungsprüfung der Geschosdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz	45
Volker Wetzck, Claudia Pahlow Das Potenzial von Miniatur-Druckproben für die Werkstoffcharakterisierung von Stahlguss	59
Kerstin Speck, Fritz Vogdt, Manfred Curbach, Yuri Petryna Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton	71
Jens Heinrich, Reinhard Maurer Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken	83
Max Käding, Gregor Schacht, Guido Bolle, Steffen Marx Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrissskorrosion	97
Florian Schill, Milo Hirsch, Andreas Eichhorn Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern	109
Jörg Scheithauer, Chris Hobusch, Falk Steinigk, Torsten Hillig, Matthias Schramm UAV und BIM – neue Herausforderungen an die Bauüberwachung bei Infrastrukturmaßnahmen an Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn	123
Nico Steffens, Kay Degenhardt, Karsten Geißler Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring	135
Marc Gutermann, Werner Malgut, Carsten Böhme Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover	147
Oliver Fischer, Sebastian Gehrlein Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke ...	161

Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern

Florian Schill¹, Milo Hirsch¹, Andreas Eichhorn²

Kurzfassung. Profilsclanner als berührungslose Messsysteme ermöglichen eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung von Objektoberflächen und können so effizient zur Überwachung von Tragwerken eingesetzt werden. Anhand von Vergleichsmessungen mit Wegaufnehmern und Beschleunigungsmessern wird gezeigt, dass mit einem Profilsclanner – bei gleichzeitig entfallendem Instrumentierungsaufwand – vergleichbare Resultate bei der Erfassung von Tragwerksverformungen erreicht werden können.

Das dafür entwickelte Konzept einer raumzeitlichen Prozessierung zur automatisierten Analyse und Verarbeitung der originären Messdaten wird kurz vorgestellt und es wird über dessen Einsatz im Kontext von Überwachungsmessungen an einer Eisenbahnüberführung berichtet. In der Diskussion der Ergebnisse werden insbesondere zwei Aspekte deutlich: (1) Tragwerke lassen sich mit Profilsclannern äußerst effizient überwachen und (2) der erreichbare Grad der raumzeitlichen Auflösung von Tragwerksbewegungen ermöglicht neue und vielversprechende Möglichkeiten bei der Interpretation des Deformationsverhaltens von Tragwerken unter Belastung.

1 Motivation

Die Überwachung der Tragwerke von Ingenieurbauwerken ist ein wichtiger Grundstein zur Gewährleistung einer sicheren technischen Infrastruktur. Aufgrund von Alterung und der vielfach gesteigerten Belastung nehmen dabei sowohl die Anzahl zu überwachender Ingenieurbauwerke als auch der Umfang der jeweiligen Überwachungsaufgaben zu. Um die daraus entstehenden Herausforderungen zu bewältigen, ergibt sich der Bedarf nach einer effizienten Erfassung von Deformationen unter dynamischer Belastung.

Aktuell sind die Hauptbestandteile solcher Messkonzepte u. a. Beschleunigungssensoren und induktive Wegaufnehmer. Diese Sensoren liefern hochgenaue Messdaten, die optimal an die jeweilige Anwendung angepasst sind, bedürfen jedoch eines hohen Arbeitsaufwands zur Montage am Messobjekt. Darüber hinaus sind insbesondere unzugängliche

¹ Dr.-Ing., Institut für Geodäsie, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt

² Prof. Dr.-Ing., Institut für Geodäsie, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt

Bereiche, die die Montage dieser Sensoren nicht zulassen, problematisch. Außerdem ist die so gewonnene Messinformation in der Regel nur an diskreten Objektpunkten verfügbar und kann ohne entsprechende Vorkenntnisse über die Tragwerkskonstruktion nicht bzw. nur schwer interpretiert werden.

Ziel dieses Beitrags ist es zu zeigen, dass Profils Scanner die Möglichkeit bieten, die oben diskutierten Probleme zu lösen und bestehende Messkonzepte zu ergänzen. Durch die wiederholte Erfassung entlang eines Messprofils besitzen die Messdaten eine räumliche und eine zeitliche Auflösung, die sich ideal mit der an diskreten Punkten gewonnenen Messinformation kombinieren lässt.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst das Messsystem vorgestellt. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3 Vergleichsmessungen mit induktiven Wegaufnehmern und Beschleunigungsmessern an einer experimentellen Fußgängerbrücke vorgestellt. Abschnitt 4 zeigt, wie die Ableitung von räumlich verteilten Zeitreihen im Kontext der raumzeitlichen Prozessierung erfolgt. Die bis dato vorgestellten Abläufe werden in Abschnitt 5 anhand eines praktischen Beispiels weiter vertieft.

2 Messsystem

Das in diesem Beitrag vorgestellte Messsystem basiert auf dem Z+F Profiler 9012, Bild 1. Bei diesem handelt es sich um einen nach dem Phasenmessprinzip arbeitenden Profils Scanner, dessen Haupteinsatzgebiet auf mobilen Plattformen liegt. Bei diesen sogenannten *Mobile-Mapping*-Systemen wird die statische Umgebung von einer sich bewegenden Plattform abgetastet und daraus eine 3D-Punktwolke berechnet.

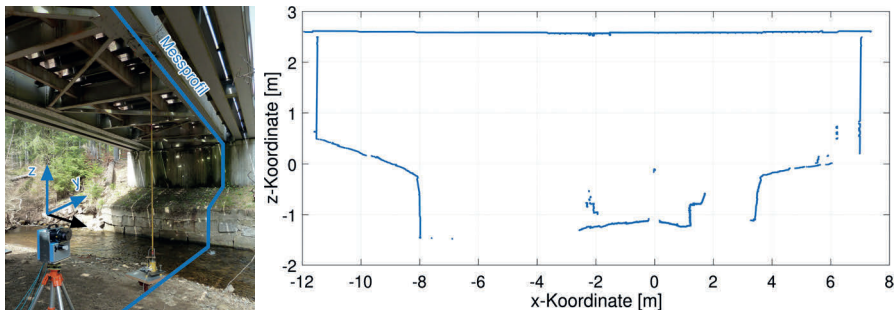


Bild 1 Profils Scanner mit Koordinatenachsen und einem schematischen (links) sowie einem gemessenen Profil (rechts)

Die Anwendung zur Überwachung von Tragwerken stellt eine Umkehrung dieses Einsatzzweckes dar: Von einer statischen Plattform aus wird ein sich bewegendes Messobjekt abgetastet. Dazu wird ein Laserstrahl in einer Richtung über das Messobjekt geführt, und zwar mit einer Wiederholrate von bis zu 200 Hz. Die maximale Messentfernung des verwendeten Systems beträgt 119 m bei einer maximalen Datenaufnahmerate von 1 Million Punkte pro Sekunde.

Als Ergebnis entsteht eine zweidimensionale Punktwolke, die in Messprofilen geordnet ist. Die einzelnen Messprofile beinhalten dabei bis zu 20000 Messpunkte pro 360° (Bild 1, rechte Seite). Zusätzlich erhält jeder Messpunkt einen Zeitstempel, da durch die Integration eines GPS-Empfängers eine hochgenaue Zeitinformation generiert werden kann.

Aufgrund des geänderten Einsatzzweckes mussten für den Profilsclanner konstruktive Adaptionen entwickelt werden. Bei diesen handelt es sich u. a. um einen Stativadapter (Bild 1), mit dem das Messsystem in verschiedenen Ausrichtungen zum Messobjekt stabil aufgebaut werden kann. Dies ermöglicht ein breites Anwendungsspektrum und die Ableitung von Deformationen unabhängig von der jeweiligen Deformationsrichtung. Ein detaillierter Überblick über die entwickelten Adaptionen und weitere Untersuchungen zu den einzelnen Profilsclannerkomponenten finden sich in [1].

Darüber hinaus existiert für den Einsatz des Profilsclanners zur Überwachung von Tragwerken auch keine Standardsoftware für die Datenverarbeitung. Dementsprechend wurde ein Prozessierungskonzept entwickelt, das der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung des Profilsclanners Rechnung trägt.

Der folgende Abschnitt konzentriert sich zunächst auf den Vergleich von Sensoren zur Überwachung von Tragwerken. Daran anschließend werden in Abschnitt 4 die Grundlagen der raumzeitlichen Prozessierung vorgestellt.

3 Vergleichsmessungen

Die Vergleichsmessungen fanden an einem Modell einer Fußgängerbrücke statt, Bild 2. Diese befindet sich auf dem Campus Lichtwiese der TU Darmstadt und wurde vom Institut für Statik und Konstruktion (ISMD) entworfen. Grundsätzlich sollen damit u. a. Untersuchungen zur Mensch-Struktur-Interaktion durchgeführt werden [2]. Das Tragwerk der Brücke besteht aus zwei Stahlträgern mit einer Spannweite von 13,2 m. Auf den Stahlträgern sind 13 vorgefertigte Betonplatten aufgelegt. Um ein Verrutschen der Platten zu verhindern, befindet sich unter den Platten zusätzlich eine ca. 5 mm dicke Elastomerschicht. Die Brücke hat ein Gesamtgewicht von 12 t, eine Grundfrequenz von ungefähr 2 Hz und eine modale Dämpfung von 0,3 %.

Im Rahmen der Vergleichsmessungen wurden an der Unterseite der Brücke sechs piezoelektrische Beschleunigungsmesser (PCB-TLD393B04) und vier induktive Wegaufnehmer (HBM 1-WA/50MM-L) montiert (Positionierung s. Bild 2).

Die Schwingungsanregung erfolgte durch über die Brücke gehende Personen, deren Schrittfrequenz sich dabei an der Brückengrundfrequenz orientierte. Die im Folgenden vorgestellten Messreihen zeigen die Schwingwege der Brücke, die durch drei hintereinander und in gleicher Richtung laufende Personen verursacht wurden. Für die Darstellungen werden exemplarisch die Messreihen an Position 4 verwendet.

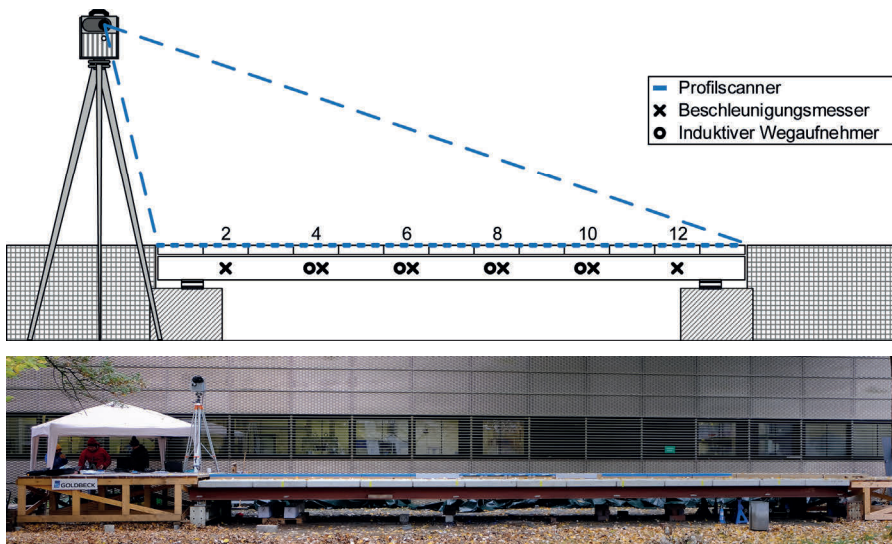


Bild 2 Brückenmodell; oben: schematischer Querschnitt mit markierten Sensorpositionen, unten: Foto des Versuchsaufbaus

Zunächst sollen die Ergebnisse der konventionellen Sensoren auf Basis der Schwingwege miteinander verglichen werden. Dazu mussten die Zeitreihen der gemessenen Beschleunigungen zweifach integriert werden (Trapezregel).

Im oberen Diagramm in Bild 3 sind die Messreihen beider Sensoren über einen Zeitraum von 180 Sekunden für die Brückenposition 4 dargestellt und im unteren Diagramm die Differenzen zwischen den originär gemessenen Werten des Wegaufnehmers und den integrierten Werten des Beschleunigungsmessers. Im Bereich der größten Amplituden treten Abweichungen von bis zu 0,5 mm auf. Es zeigt sich, dass der induktive Wegaufnehmer absolut gesehen immer leicht kleinere Verschiebungen erfasst als aus der Integration der Beschleunigungsmessungen folgen. Aus der Proportionalität der Differenzamplitude zu den Schwingwegen kann dabei auf einen Maßstabsfaktor geschlossen werden. Dies kommt aller Voraussicht nach aus Nichtlinearitäten in der kalibrierten Übertragungsfunktion der Beschleunigungsmesser bzw. dabei nicht erfasster Temperatureffekte und variiert an den Positionen 4 bis 10 zwischen +1 und +3 %.

Um diese Ergebnisse zu verifizieren, wurde die Schwingung der Brücke zusätzlich mit einem Profilschanner erfasst. Wie Bild 2 zeigt, konnte der Profilschanner aufgrund von Platzproblemen nicht unterhalb der Brücke, sondern nur auf einem Stativ ca. 2 m über der Brückenoberfläche aufgebaut werden. Somit wurde ein anderer Bereich der Brücke gemessen, wodurch die Messpunkte der Sensoren nicht mehr exakt identisch sind (Stahlträgerunterseite vs. Betonoberfläche). Wie die folgenden Darstellungen zeigen, hat dies aber für die erfassten Schwingwege keine relevanten Auswirkungen.

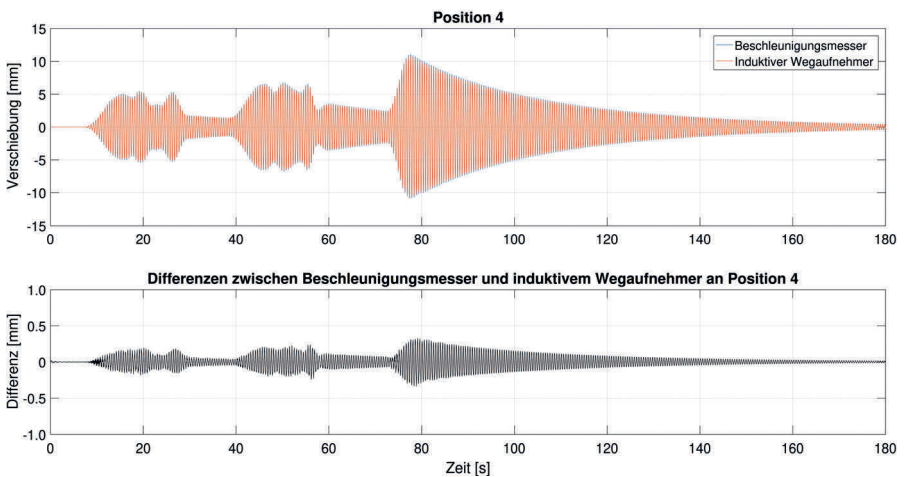


Bild 3 Vergleich eines induktiven Wegaufnehmers mit den integrierten Beschleunigungsmessungen an Position 4

Da der Profilsclanner die komplette Brückenoberfläche mit mindestens 50 Hz erfasst, kann so die Brückenbewegung räumlich und zeitlich nahezu vollständig aufgelöst werden, was in Abschnitt 4 detailliert präsentiert wird.

Für den Vergleich mit den Ergebnissen der konventionellen Sensorik an der Brückenposition 4 ist jedoch lediglich ein kleiner Ausschnitt des Messprofils um diese Position relevant. Zu diesem Zweck werden die gemessenen Tragwerkspunkte innerhalb dieser räumlichen Einheit (Winkelbereich) gemeinsam mit dem Ziel verarbeitet, eine abgeleitete Messgröße (Repräsentant) für diesen Teil des Profils (räumliche Klasse, vgl. Abschnitte 4 und 5) zu erzeugen. Durch die explizite Definition der räumlichen Einheit kann direkt festgelegt werden, welche Punkte des Tragwerksprofils in die Berechnung des Repräsentanten mit eingehen. Für den Vergleich mit den konventionellen Sensoren wurde dafür jeweils ein Bereich symmetrisch um die entsprechende Sensorposition ausgewählt.

In Bild 4 sind für die Brückenposition 4 die Differenzen zwischen der Zeitreihe des Repräsentanten des Profilsclanners und den integrierten Wegen des Beschleunigungsmessers bzw. den direkt gemessenen Verschiebungen des Wegaufnehmers gegenübergestellt.

Der Vergleich der Differenzen-Zeitreihen aus dem oberen Diagramm in Bild 4 mit dem unteren Diagramm in Bild 3 zeigt, dass sich trotz des höheren Rauschens die gleichen Systematiken identifizieren lassen, wobei Größenordnung und Position sehr gut übereinstimmen. Im unteren Diagramm von Bild 4 ist die Differenzen-Zeitreihe aus dem Vergleich des Profilsclanners mit dem Wegaufnehmer dargestellt. Hier lassen sich keine signifikanten Systematiken erkennen. Werden die Differenzen dieser Zeitreihe als zufällig verteilt angenommen, ergibt sich die Standardabweichung für eine Differenz von weniger als 0,1 mm. Diese Unsicherheit entspricht ungefähr der, die für einen Repräsentanten einer räumlichen

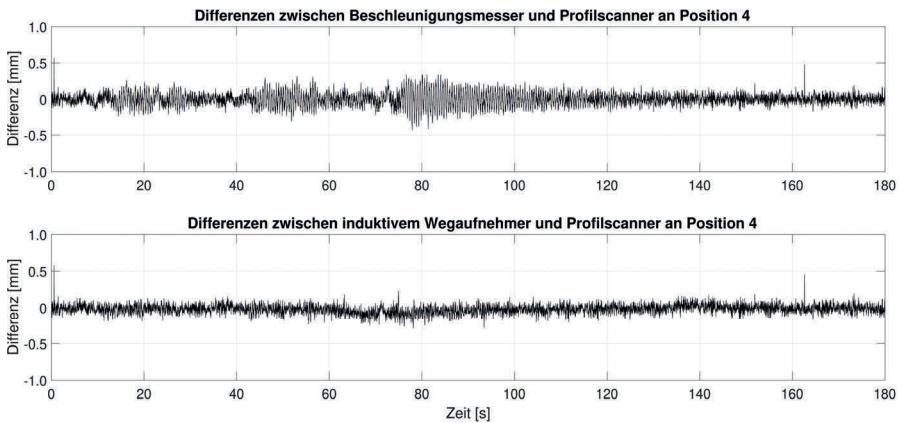


Bild 4 Vergleich des Profilschanners mit konventionellen Sensoren für die Überwachung von Tragwerken

Klasse abgeleitet wird und charakterisiert damit qualitativ die aus den Profilschannermessungen abgeleiteten Schwingwege.

Diese Ergebnisse zeigen, dass mit Profilschannermessungen vergleichbare Resultate bei der Erfassung von Verschiebungen erzielt werden können. Gegenüber der vorgestellten konventionellen Sensorik entfällt bei diesem berührungslos messenden System zudem der Montageaufwand. Darüber hinaus ergeben sich durch die profilweise Erfassung des Tragwerks neue und vielversprechende Möglichkeiten der raumzeitlichen Auflösung von Tragwerksbewegungen.

Zur Nutzung dieses Potenzials wurde das Konzept der raumzeitlichen Prozessierung von Profilschannermessungen entwickelt, das im nächsten Abschnitt vorgestellt und über dessen erfolgreiche Anwendung im 5. Abschnitt berichtet wird.

4 Raumzeitliche Prozessierung von Profilschannermessungen

Der eingesetzte Profilschanner erfasst eine Tragwerksoberfläche profilweise mit bis zu 200 Hz. Die dabei entstehenden Messpunkte sind sowohl räumlich (über ihre Position im Profil) als auch zeitlich (GPS-Zeitstempel) definiert. Dementsprechend bedarf es einer räumlichen und zeitlichen Prozessierung, um räumlich am Tragwerk verteilte Zeitreihen und deren Unsicherheiten abzuleiten.

Da die originären Messwerte (Distanz, Winkel) jedoch nicht unmittelbar für die Überwachung von Tragwerken nutzbar sind (nicht direkt zugänglich und lokal nicht direkt reproduzierbar), ist ein vorgeschalteter Analyseschritt notwendig, d. h. jedes Messprofil muss zunächst im Kontext der jeweiligen Tragwerksoberfläche analysiert werden. Als Resultat dieser Analyse entsteht ein Tragwerksprofil, das nur noch Profilupunkte enthält, die hinsicht-

lich der Tragwerksoberfläche relevant sind. Aufgrund der Vielzahl der zu einem Scan gehörenden Messprofile kann diese Analyse aus Effizienzgründen nur automatisiert erfolgen. Demzufolge setzt sich das raumzeitliche Prozessierungsschema aus drei Teilen zusammen:

1. Automatische Analyse der Messprofile,
2. Profilweise räumliche Prozessierung der Tragwerksprofile,
3. Scanweise zeitliche Prozessierung der Tragwerksprofile.

Der detaillierte Ablauf der gesamten Prozessierung ist in Bild 5 dargestellt.

An dieser Stelle soll nur die automatische Analyse der Messprofile [3] näher betrachtet werden, da sie von essenzieller Bedeutung für die Nutzung des Profilsclanners zur Überwachung von Tragwerken ist. Im Rahmen dieser Analyse erfolgt eine automatische Segmentierung des Messprofils, die sich an der Struktur der Tragwerksoberfläche orientiert und aus dem Messprofil ein (segmentiertes) Tragwerksprofil generiert. Simultan wird damit der Übergang von einer punktwisen Betrachtung des komplexen Messprofils zur Betrachtung von einfach strukturierten Tragwerkssegmenten vollzogen. Die automatische tragwerksorientierte Segmentierung erfolgt dabei unter Verwendung von markanten Punkten (Unstetigkeiten) im Profil, die durch die Analyse automatisiert identifiziert werden müssen.

Zur Veranschaulichung der Problematik ist in Bild 6, Punkt 1, ein Ausschnitt eines Messprofils mit 1000 Messpunkten dargestellt. Die markanten Profilpunkte lassen sich durch zwei Arten von Unstetigkeit erkennen:

- Sprünge: abrupte Niveauänderungen **ohne** Rückkehr auf das Ausgangsniveau, u. a. im Bereich zwischen den Punktnummern 100 bis 300,
- Spitzen: abrupte Niveauänderungen **mit** Rückkehr auf das Ausgangsniveau, u. a. im Bereich zwischen den Punktnummern 300 bis 800.



Bild 5 Ablaufdiagramm der raumzeitlichen Prozessierung

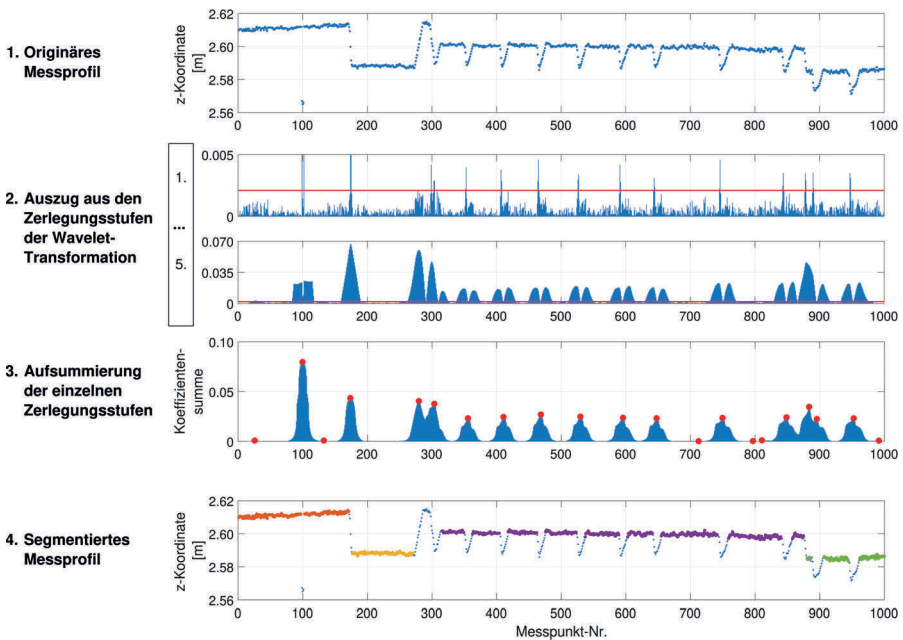


Bild 6 Automatische Analyse eines Messprofilausschnittes

Zur automatischen Identifizierung der Unstetigkeiten wird die *Wavelet*-Transformation [4], [5] eingesetzt. Dabei handelt es sich, ähnlich wie bei der Fourier-Transformation, um eine Ort- bzw. Zeit-Frequenztransformation, wobei im Gegensatz zur Fourier-Transformation sowohl eine Ort- bzw. Zeit- sowie eine Frequenzinformation erhalten bleibt, die für die Lokalisierung der Unstetigkeiten im Profil genutzt werden. Durch die *Wavelet*-Transformation wird das Messprofil (vereinfacht dargestellt) stufenweise in einzelne Frequenzbänder zerlegt (Bild 6, Punkt 2). Hier sind exemplarisch die hochfrequenten Anteile (Stufe 1) und die niederfrequenten Anteile (Stufe 5) des Messprofils in Form der *Wavelet*-Koeffizienten dargestellt. In beiden Stufen lässt sich eine Gruppierung der Koeffizienten an den Positionen der gesuchten Unstetigkeitsstellen erkennen. Um die Lokalisierung zu vereinfachen, werden mit einer schwellwertbasierten Filterung der Koeffizienten (rote Linien) zusätzlich Rauschteile eliminiert.

Um eine zuverlässige Lokalisierung zu gewährleisten, werden die Beträge aller Koeffizienten über die Zerlegungsstufen aufsummiert (Bild 6, Punkt 3). Somit ist sichergestellt, dass alle spektralen Anteile des Messprofils in die Lokalisierung der Unstetigkeitsstellen mit einbezogen werden. Die exakten Positionen der lokalisierten Unstetigkeitsstellen ergeben sich dann aus den lokalen Maxima dieser Betragskoeffizientensumme (rote Punkte). Lokale Maxima unterhalb der Signifikanzgrenze deuten auf Fehlidentifizierungen hin und werden

automatisch eliminiert. Anschließend erfolgt für die identifizierten Unstetigkeiten die Klassifizierung in Sprünge und Spitzen.

Mit dieser Information kann anschließend die Segmentierung in einfache Tragwerkssegmente durchgeführt werden (Bild 6, Punkt 4, verschiedenfarbig markierte Abschnitte). Nach Abschluss der automatischen Analyse der Messprofile liegen Tragwerkssegmente vor, die im Anschluss räumlich und zeitlich prozessiert werden. Dabei kann für die räumliche Prozessierung eine Vielzahl von Approximationsverfahren verwendet werden, wie z. B. die räumliche Klassenbildung [3], *B-Splines* [6] oder auch erneut die *Wavelet-Transformation*, in diesem Fall in Form des *Wavelet Denoising* [7].

Die abschließende zeitliche Prozessierung dient einerseits der Erkennung und Eliminierung von noch vorhandenen Ausreißern in den abgeleiteten räumlich verteilten Zeitreihen und andererseits der Unsicherheitsbestimmung der Zeitreihen. Somit kann eine qualifizierte Aussage über das Deformationsverhalten des Tragwerks getroffen werden, und zwar nahezu kontinuierlich entlang des gesamten Tragwerksprofils.

Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Schritte der raumzeitlichen Prozessierung findet sich in [1]. Im folgenden Abschnitt wird über die Anwendung der raumzeitlichen Prozessierung von Profilsclannermessungen im Rahmen einer Überwachungsmessung berichtet.

5 Überwachung einer Eisenbahnüberführung



Bild 7 Seitenansicht der Eisenbahnüberführung über die Schmutter bei Augsburg

Die untersuchte Eisenbahnüberführung hat eine Spannweite von 19,5 m, Bild 7. Sie befindet sich auf der Strecke 5302 (Augsburg–Ulm) und führt über die Schmutter. Sie besteht aus zwei nebeneinanderliegenden Stahl-Hohlkastenquerschnitten, über die jeweils mittig ein Gleis führt, siehe Grundriss in Bild 8. Beide Teilbrücken sind über den Schotteroberbau miteinander verbunden.

Darüber hinaus sind die Obergurte der Hohlkästen mittels U-Profilen verbunden.

In der schematischen Darstellung in Bild 8 ist die Position des Profilsclanners (rote Markierung) im Grund- und Aufriss gezeigt; in den folgenden Diagrammen entspricht dieser Standpunkt jeweils dem Koordinatenursprung. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten musste der Standpunkt des Profilsclanners am Ufer in der Nähe eines Widerlagers gewählt werden. Zusätzlich sind auch die beiden Messkonfigurationen in Form der gemessenen Tragwerksprofile farblich (blau, grün) markiert.

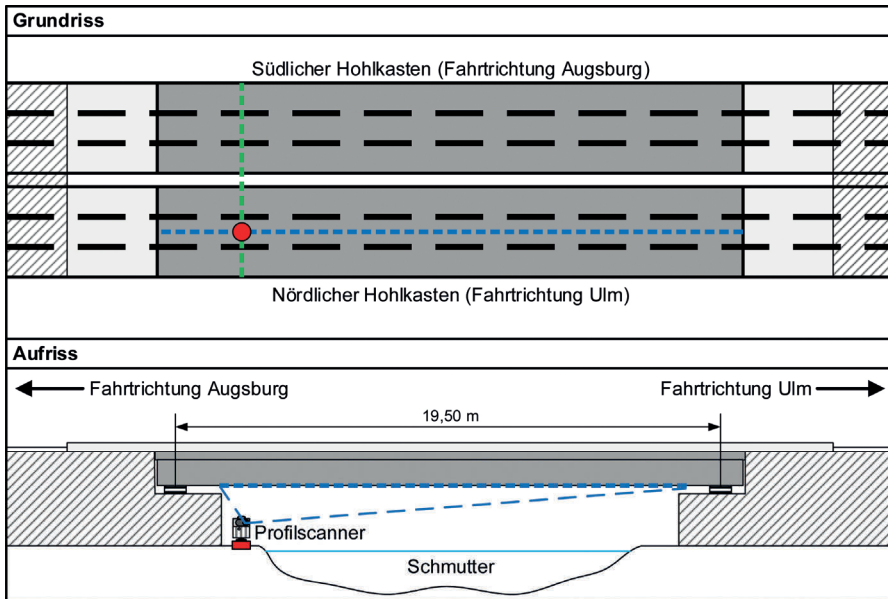


Bild 8 Eisenbahnüberführung im Grund- und Aufriss mit markiertem Profils Scannerstandpunkt

In Bild 9 ist die automatische Analyse eines Messprofils und dessen Aufbereitung im Rahmen der räumlichen Prozessierung veranschaulicht. Im oberen Diagramm ist zunächst ein originäres Messprofil in Brückenlängsrichtung mit über 17000 Messpunkten dargestellt. Das mittlere Diagramm zeigt lediglich den für die Tragwerksüberwachung relevanten Teil dieses Profils, d. h. ein vollständiges Profil entlang der Unterseite des nördlichen Hohlkastens. Die Unterseite des Hohlkastens ist nahezu ohne Strukturierung, sodass am Tragwerk fast keine relevanten Unstetigkeiten auftreten. Dies führt zu einer sehr geringen Anzahl von automatisch identifizierten Tragwerkssegmenten (s. farbige Markierungen). Neben einem dominanten blauen Segment sind im linken Teil des Diagramms drei kleinere Segmente zu erkennen, die aufgrund einer teilweisen Abschattung durch ein Baugerüst erzeugt werden. Für die anschließende räumliche Prozessierung werden diese vier Segmente jeweils in Abschnitte gleicher Winkelbereiche unterteilt. Diese Abschnitte werden *Klassen* genannt und sind im unteren Diagramm verschiedenfarbig dargestellt.

Aus den räumlich am Tragwerk verteilten Klassen kann z. B. durch Mittelwertbildung jeweils ein Klassenrepräsentant bestimmt werden. In diesem Beispiel wird so ein Tragwerksprofil mit 81 Klassenrepräsentanten inklusive einer Unsicherheitsangabe erzeugt. Durch die hochfrequente profilweise Aufnahme entstehen für jeden dieser Repräsentanten Zeitreihen. In Bild 10 sind exemplarisch die Zeitreihen eines Repräsentanten in der Tragwerksmitte während zweier ICE-Überfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt (vgl. Bild 9, x-Koordinate bei ca. 8 m).

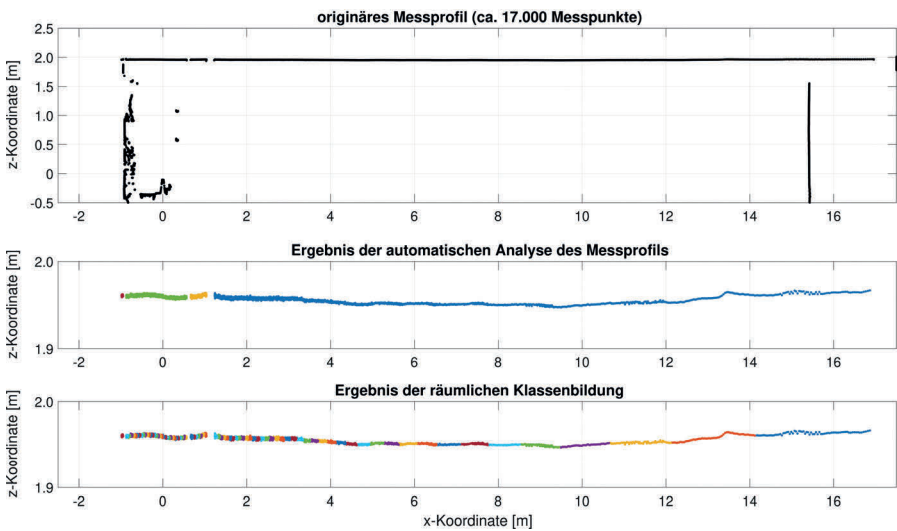


Bild 9 Automatische Analyse des Messprofils (vgl. Bild 5)

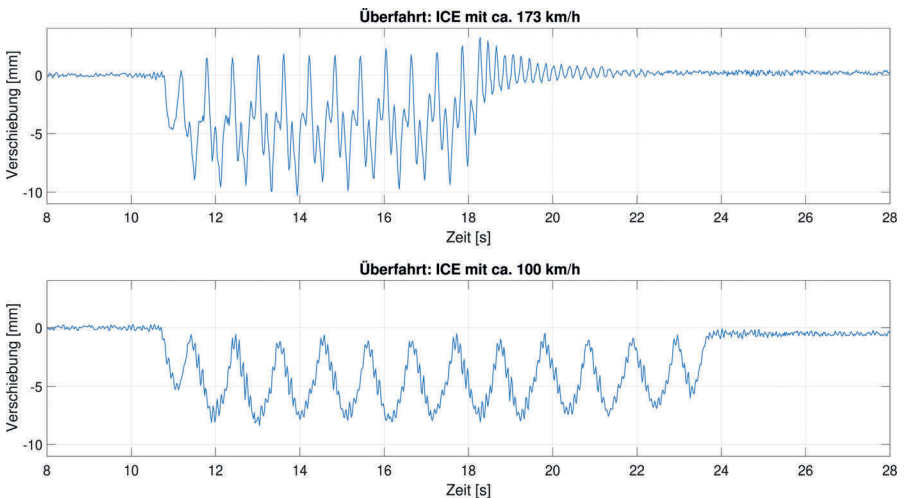


Bild 10 Zeitreihen eines Klassenrepräsentanten in der Brückenmitte für zwei Zugüberfahrten

Bei einer Überfahrt mit 173 km/h zeigen sich in der Zeitreihe des Tragwerks Resonanzbewegungen, gut erkennbar an dem klaren freien Ausschlagen, nachdem der Zug die Brücke verlassen hat ($t \approx 18,2$ s). Im Gegensatz dazu tritt bei der Überfahrt mit 100 km/h keine Resonanz auf, es existieren nur negative Verschiebungen und kein Überschlagen über die Nulllage des Hohlkastens. Das sehr gute Signal-Rausch-Verhältnis der beiden

exemplarischen Zeitreihen zeigt, dass Profilschannermessungen bei geeigneter Prozessierung uneingeschränkt für die Überwachung des Tragwerks eingesetzt werden können. Überdies können durch die berührunglose Erfassung der Tragwerksoberfläche sehr schnell weitere Informationen für zu analysierende Tragwerkspunkte beschafft werden, sodass es möglich ist, vor Ort flexibel auf sich verändernde Fragestellungen zu reagieren, was im Folgenden erläutert wird.

Im unteren Diagramm in Bild 10 lässt sich nach der Überfahrt ($t \approx 24$ s) ein Offset von ca. 0,5 mm erkennen. Daraus resultiert zunächst die Fragestellung, ob sich dieses Verhalten auch in den Zeitreihen der anderen 81 Klassenrepräsentanten zeigt. Da dieser Effekt rein statischer Natur ist, wurde zur näheren Betrachtung zusätzlich eine zeitliche Mittelung in allen verfügbaren 81 Zeitreihen durchgeführt. Dazu wurden jeweils zeitliche Epochen vor und nach der Zugüberfahrt verwendet, in denen sich die Brücke in Ruhe befindet. Als Ergebnis können so die räumlich aufgelösten statischen Deformationen entlang des Tragwerksprofils nach der Überfahrt dargestellt werden, s. Bild 11. Es zeigt sich ein systematisches Deformationsverhalten, das in der Tragwerksmitte sein Maximum besitzt und zum Rand hin abnimmt. Die Nulldurchgänge des geschätzten quadratischen Polynoms entsprechen dabei den Positionen der Widerlager der Brücke (Abstand 19,5 m, vgl. Bild 8).

Dieses Beispiel demonstriert, wie sich die zeitlich redundante Erfassung mit dem Profilschanner entlang des gesamten Tragwerksprofils zur Ergebnisverifizierung verwenden lässt, um so neue Einsichten in das Deformationsverhalten des Tragwerks unter Belastung zu erhalten, s. auch [8].

Für die erweiterte Analyse dieses Deformationsverhaltens wurde eine zweite Messkonfiguration umgesetzt, mit der die Deformationen quer zur bisherigen Messrichtung erfasst werden konnten (grüne Linie im Grundriss in Bild 8). Bild 12 zeigt die Ergebnisse der prozessierten Messprofile an den Unterseiten der beiden Hohlkästen. Im oberen Diagramm wurden die statischen Deformationen durch die Überfahrt eines Regionalexpress und im unteren durch einen ICE verursacht. Beide Diagramme zeigen ein identisches Deformationsbild: Durch die Überfahrt in Fahrtrichtung Ulm wird der belastete Hohlkasten nach unten gedrückt und der unbelastete angehoben. Darüber hinaus verkippen beide Hohlkästen zusätzlich quer zur Fahrtrichtung. Die maximale Deformation beträgt in diesem Fall am Rand des nördlichen Hohlkastens (Fahrtrichtung Ulm) knapp 0,4 mm.

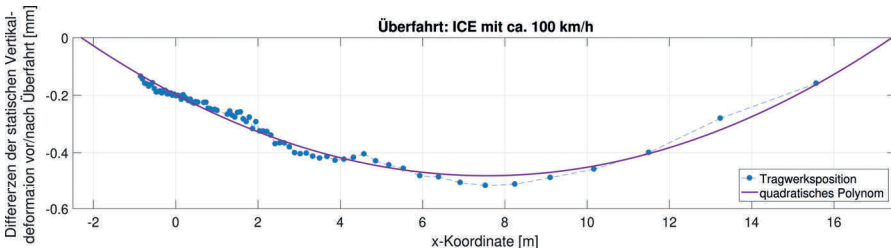


Bild 11 Statische Deformationen entlang des Tragwerksprofils nach einer Zugüberfahrt

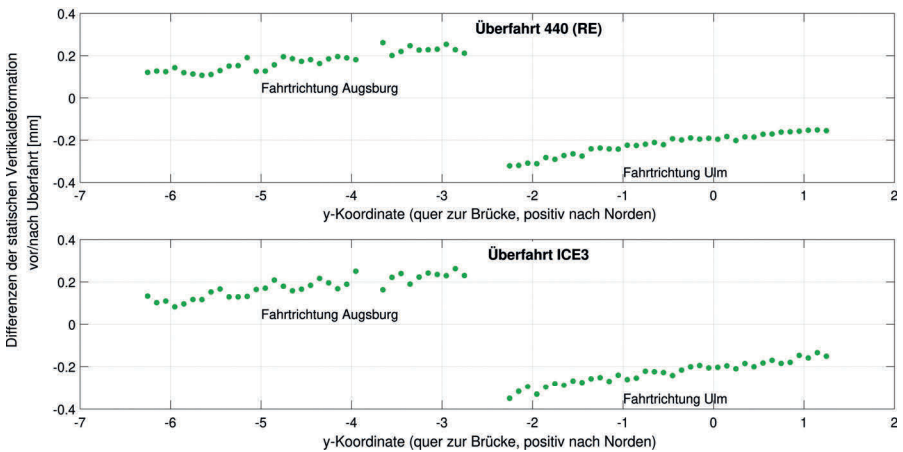


Bild 12 Statische Deformationen entlang des Tragwerksprofils quer zur Fahrtrichtung nach zwei Zugüberfahrten

Zur Verifikation der in den beiden senkrecht aufeinander stehenden Messrichtungen abgeleiteten Deformationen soll beispielhaft der Tragwerkspunkt direkt über dem Profilsclanner betrachtet werden. Dieser Punkt besitzt sowohl in Bild 11 als auch in Bild 12 die x- bzw. y-Koordinate mit dem Wert 0 m. Der an diesen Stellen bestimmte Wert für die abgeleitete Deformation beträgt jeweils -0,2 mm. Durch die Kombination und Verifikation dieser beiden Darstellungen wird die 3D-Gesamtverformung des Hohlkastens in Fahrtrichtung Ulm interpretierbar. Da es zu einer Durchbiegung in Längsrichtung und zusätzlich zu einer Verkippung in Querrichtung kommt, existiert die maximale Verformung vermutlich am südlichen Rand des Hohlkastens in der Brückenmitte mit einer Amplitude von ca. 0,7 mm.

Die aufgezeigte statische Verformung konnte im Rahmen der Messkampagne in nahezu allen Messungen (Überfahrten Richtung Ulm) nachgewiesen werden und dauerte an, bis ein Zug die Brücke in die Gegenrichtung (Richtung Augsburg) überquerte. Bei diesen Überfahrten zeigte sich ebenfalls ein entsprechendes Verformungsbild, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen.

6 Fazit

Durch die flexible Einsetzbarkeit des Profilsclanners und die mit der entwickelten Messdatenprozessierung erreichbaren Deformationsergebnisse eignet sich dieses Messsystem, um bestehende Messkonzepte zu ergänzen, zu erweitern oder sogar zu ersetzen. Die Profilsclannermessungen können darüber hinaus auch zur Generierung von Vorinformationen für z. B. größere Messkampagnen verwendet werden. Durch die automatische Auswertung, die auch zur Veranschaulichung (Animation) der Bewegungsabläufe genutzt werden kann, bieten sich solche Messungen u. a. für eine erste Untersuchung der Trag-

werksstruktur an. Mit deutlich geringerem Aufwand können so eine detaillierte Aufbereitung der Struktur der Tragwerksoberfläche erzeugt, einzelne Bauteile auf ein atypisches Deformationsverhalten analysiert und durch die Generierung von Vorinformationen die Messplanung optimiert werden. Durch die Möglichkeit der getrennten Analyse des Deformationsverhaltens aller im Messprofil enthaltenen Bauteile besteht darüber hinaus auch die Möglichkeit, die Positionierung von konventionellen Sensoren zu optimieren.

Literatur

- [1] Schill, F.: Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern. Diss., TU Darmstadt, 2018
- [2] Firus, A.; Schneider, J.; Berthold, H.; Albinger, M.; Seyfarth, A.: Parameter identification of a biodynamic walking model for human-structure interaction. In: Power, N.; Frangopol, D. M.; Al-Mahaidi, R.; Caprani, C. (Hrsg.): Proc. of 9th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, 9.-13.7.2018 in Melbourne (Australien), 2018, S. 668-674
- [3] Schill, F.; Eichhorn, A.: Automatische Segmentierung von Profilsclannermessungen am Beispiel von Brückenbauwerken. In: Lienhart, W. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 17 – Beiträge zum 18. Int. Ingenieurvermessungskurs, 25.-29.4.2017 in Graz (Österreich), 2017, S. 389-401
- [4] Bäni, W.: Wavelets: Eine Einführung für Ingenieure. Oldenbourg Verlag, 2005
- [5] Percival, D. B.; Walden, A. T.: Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics, Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [6] Schmitt, C.; Neuner, H.: Knot estimation on B-Spline curves. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 103 (2015) 2+3, S. 188-197
- [7] Donoho, D. L.; Johnstone, I. M.: Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. Biometrika 81 (1994) 3, S. 425-455
- [8] Wujanz, D.; Paffenholz, J.-A.; Schill, F.; Burger, M.; Stenz, U.; Lichtenberger, R.; Neitzel, F.; Eichhorn, A.; Neumann, I.: Terrestrisches Laserscanning für die Überwachung von Brücken bei Belastungsversuchen. In: Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerkskalender 2018, Berlin : Ernst & Sohn, 2018, S. 221-239

Bildnachweis

Alle Bilder: Florian Schill

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 48

Das 10. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ fand am 11. März 2019 an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

Das Symposium wurde mit einem Vortrag über Analogieübertragungen und Sicherheitsaspekte bei experimentellen Bauwerksuntersuchungen eröffnet. Zum Thema Messtechnik wurden in diesem Jahr vor allem faseroptische Systeme und deren Anwendung sowie die Möglichkeiten digitaler bildgebender Verfahren diskutiert. Zwei Vortragende stellten Messmethoden vor, die auf Schwingungsanregungen beruhen, einmal zur Bestimmung von Stabkräften und einmal für die Prüfung von Befestigungen. Als Fortsetzung eines Beitrags zum 9. SEUB wurde das Potential von Miniaturproben zur Kennwertermittlung dargelegt.

Berichte über Projekte zur Thematik Bauwerksbeprobung und Monitoring rundeten das Vortragsprogramm ab. Neben einem Beispiel aus dem Hochbau nahmen beim 10. SEUB vor allem Projekte aus dem Brückenbau eine dominierende Rolle ein. Die Spanne reichte von der Anwendung faseroptischer Messmethoden bei 1:1-Versuchen über die realitätsnahe Bestimmung von Ziellastniveaus bis zu In-situ-Tests an Brückenbauwerken.