Dies ist die angenommene Version des folgenden Artikels:

Simon, P.; Helmrich, M.; Herrmann, R.; Schneider, R.; Baeßler, M.; Lorelli, S.; Morgenthal, G. (2022) *Maintalbrücke Gemünden: Bauwerksmonitoring und -identifikation aus einem Guss.* Bautechnik 99, H. 3, S. 163–172,

die in endgültiger Form veröffentlicht wurde unter <u>https://doi.org/10.1002/bate.202100102</u>. Dieser Artikel darf für nicht-gewerbliche Zwecke entsprechend der Wiley Selbstarchivierungs-Richtlinie verwendet werden (https://authorservices.wiley.com/author-resources/Journal-Authors/licensing/self-archiving.html)

[Patrick Simon] (Hauptautor), [Marcel Helmrich] (Co-Autor 1), [Ralf Herrmann] (Co-Autor 2), [Ronald Schneider] (Co-Autor 3), [Matthias Baeßler] (Co-Autor 4), [Salvatore Lorelli] (Co-Autor 5), [Guido Morgenthal] (Co-Autor 6)

Maintalbrücke Gemünden: Bauwerksmonitoring und -identifikation aus einem Guss

Die Infrastruktursysteme der Industriestaaten erfordern heute und in Zukunft ein effizientes Management bei alternder Bausubstanz, steigenden Lasten und gleichbleibend hohem Sicherheitsniveau. Digitale Technologien bieten ein großes Potenzial zur Bewältigung der aktuellen und künftigen Herausforderungen im Infrastrukturmanagement. Im BMBFgeförderten Projekt *Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien (AISTEC)* wird untersucht, wie unterschiedliche Technologien und deren Verknüpfung gewinnbringend eingesetzt werden können. Am Beispiel der Maintalbrücke Gemünden werden ein sensorbasiertes Bauwerksmonitoring, bildbasierte Inspektion mit durch Kameras ausgestatteten Drohnen (UAS) und die Verknüpfung digitaler Bauwerksmodelle umgesetzt. Die aufgenommenen Bilder dienen u. a. als Grundlage für spätere visuelle Anomaliedetektionen und eine 3D-Rekonstruktion, welche wiederum für die Kalibrierung und Aktualisierung digitaler Tragwerksmodelle genutzt werden. Kontinuierlich erfasste Sensordaten werden ebenfalls zur Kalibrierung und Aktualisierung der Tragwerksmodelle herangezogen. Diese Modelle werden als Grundlage für Anomaliedetektionen und perspektivisch zur Umsetzung von Konzepten der prädiktiven Instandhaltung verwendet. Belastungsfahrten und historische Daten dienen in diesem Beitrag zur Validierung der kalibrierten Tragwerksmodelle.

Stichworte Bauwerksüberwachung, Strukturmonitoring, Structural Health Monitoring, Modell Update, UAS, Belastungstest

Maintalbrücke Gemünden – Integrated Structural Health Monitoring and UAS diagnostics

Infrastructure systems of industrialised countries today and in the future require efficient management with an ageing stock, increasing loads while simultaneously maintaining a high level of safety. Digital technologies offer great potential for the current and future challenges in infrastructure management. The BMBF-funded project AISTEC is investigating how the individual technologies and their interconnection can be used beneficially. With the Maintalbrücke in Gemünden as an exemplary application, sensor-based structural monitoring, image-based inspection using unmanned aircraft systems (UAS) equipped with cameras and the integration of digital structural models are being implemented. The recorded images serve, among others, as basis for subsequent anomaly detection and a 3D reconstruction, which in turn are used for updating digital structural models. Continuously recorded sensor data is used to update the parameters of the structural models, which in turn provide the basis for predictive maintenance. Load tests are used to validate the models.

Keywords structural system identification, structural health monitoring, model update, UAS, load tests

1 Einführung

Eine zuverlässig funktionierende Verkehrsinfrastruktur ist Grundlage jeder Volkswirtschaft. Im Licht alternder Infrastrukturbauwerke sowie eines gesteigerten Verkehrsaufkommens und der damit einhergehenden gesteigerten Beanspruchung der Bauwerke stehen die Betreiber vor der Aufgabe, die Zuverlässigkeit dieser sicherzustellen.

Sowohl außergewöhnliche Ereignisse wie Extremwetterereignisse oder Fahrzeuganprall als auch andauernde Schädigungsprozesse können Ausfälle oder dauerhafte Betriebseinschränkungen inklusive volkswirtschaftlicher Einbußen zur Folge haben [1].

Die Sicherstellung der Zuverlässigkeit erfolgt gegenwärtig durch wiederkehrende visuelle Bauwerksprüfungen nach den Maßgaben der DIN 1076. Hier zeichnen sich Herausforderungen ab:

Der perspektivisch anhaltende Fachkräftemangel und eine alternde Bausubstanz erhöhen die Ansprüche an die Inspektions- und Instandhaltungsplanung. In anderen Industriezweigen kommt für ähnliche Fragestellungen das Konzept der prädiktiven Instandhaltung zum Einsatz. Hierbei werden Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen anhand vorhandener Zustandsinformationen und prognostizierter Zustandsveränderungen optimiert. Für Tragstrukturen von Windenergieanlagen sind bereits Methoden erforscht [2]. Es existieren ebenfalls Ansätze zur Übertragung dieser Methoden auf Brückenbauwerke [3].

Bauwerksmonitoring und -diagnose sind Kernelemente eines nachhaltigen Infrastrukturmanagements der Zukunft. Sie dienen der Erfassung und Bewertung des Bauwerkszustands und unterstützen somit die Entscheidungsfindung bezüglich Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen [4]. Für diese Aufgaben werden in der Zukunft digitale Technologien wie das sensorbasierte Bauwerksmonitoring und bildbasierte Inspektionen mit durch Kameras ausgestatteten unbemannten Flugsystemen (*engl.: Unmanned Aircraft Systems*; UAS) unerlässlich sein [5].

Im BMBF-geförderten Verbundforschungsprojekt *Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien* (AISTEC) werden die Potenziale eines kombinierten sensor- und bildbasierten Bauwerksmonitorings, wie in [6] vorgestellt und in Bild 1 veranschaulicht, erforscht. In diesem Artikel wird eine Auswahl der im AISTEC-Projekt betrachteten Technologien und Methoden am Beispiel der Maintalbrücke Gemünden, die im nachfolgenden Abschnitt genauer beschrieben wird, vorgestellt.



Bild 1 Interaktionen der verschiedenen Methoden

Quelle: Bauhaus-Universität Weimar & BAM

Interaction of the various methods

Mittels einer ersten UAS-Befliegung wurde, wie in Abschnitt 3 beschrieben, die aktuelle Geometrie der Brücke aufgenommen, die sowohl als Grundlage für eine erneute Flugroutenplanung als auch für die Erstellung von Simulationsmodellen dient [5, 7]. Durch wiederkehrende Befliegungen können Verformungen und Veränderungen der

Geometrie des Bauwerks sowie Schäden ermittelt werden (siehe Abschnitt 4).

Durch ein kontinuierliches, sensorbasiertes Monitoring (siehe Abschnitt 5) werden regelmäßig oder ereignisausgelöst Messgrößen von am Bauwerk applizierten Sensoren ausgelesen und an einer zentralen Stelle zusammengeführt [8].

Für eine quantitative Bewertung der Bauwerkszuverlässigkeit ist ein qualitativ hochwertiges Tragwerksmodell, wie in Abschnitt 6 beschrieben, notwendig. Dieses wird zunächst, wie in Abschnitt 7 dargestellt, anhand von Monitoringdaten kalibriert, um das reale Tragverhalten adäquat widerzuspiegeln. Das kalibrierte Tragwerksmodell wird perspektivisch kontinuierlich mit neu erfassten Daten aktualisiert, um Bauwerksveränderungen zu identifizieren und zu bewerten [9, 10].

Eine Besonderheit stellen die in Abschnitt 8 vorgestellten quasi-statischen Belastungsfahrten dar, mit denen zusätzliche Informationen über das Tragwerksverhalten gewonnen wurden. Durch wiederholte Belastungsfahrten können ebenfalls Veränderungen des Tragverhaltens bestimmt werden [11].

2 Maintalbrücke Gemünden

Die in den 1970/80er-Jahre errichtete Neubaustrecke Hannover-Würzburg überquert das Maintal in der Nähe von Gemünden am Main ca. 40 km nördlich von Würzburg. Auf Anfrage der Deutschen Bahn (damals Deutsche Bundesbahn) überarbeiteten *Leonhardt, Andrä und Partner* den ersten Entwurf für die Talbrücke [12] und sahen für die Strombrücke statt eines gevouteten Dreifeldträgers eine Rahmenbrücke mit V-Stützen vor (siehe Bild 2 und Bild 6). Im Folgenden wird die Bezeichnung "Maintalbrücke Gemünden" synonym für die Strombrücke verwendet.



Bild 2 Ansicht der Strombrücke, Blick in Richtung Osten, Gemünden am Main

Quelle: Fred Ziegler/BAM

Elevation of the main bridge, Eastern view to Gemünden am Main

Das statische System des im Freivorbau errichteten Überbaus wirkt als Durchlaufträger mit variablen Stützweiten. Durch die V-Stützen vermindert sich die Hauptspannweite von 135 m auf 105 m. Der Querschnitt wurde als Hohlkasten mit variablen Höhen von 4,5 m bis 6 m ausgeführt. Eine Besonderheit der Konstruktion sind die Betongelenke unter den V-Stützen, die zu den am höchsten belasteten ihrer Art zählen [13].

Zur Bauzeit zwischen 1982-1984 (und auch darüber hinaus) war die semiintegrale Bauweise ein Novum für Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn. Folglich begleiteten Messkampagnen die Vorbereitungen der Inbetriebnahme [14]. Die Besonderheiten des Bauwerks und die im Entwurf getroffenen Annahmen (u. a. hinsichtlich der Zwangsbeanspruchungen aus Temperaturverteilungen) können nach 35 Jahren Betriebszeit mit Methoden digitaler Bauwerksmodelle überprüft werden. Das Vorliegen historischer Messungen ermöglicht zudem, Veränderungen zu registrieren.

3 Initiales Geometriemodell aus 3D-Punktwolken

Zur Ermittlung unbekannter Parameter während eines Kalibrierungs-/Identifikationsprozesses (siehe Abschnitt 7) müssen Parameter wie Geometrie und einwirkende Lastgröße bekannt sein. Alte Ausführungspläne von Bestandsbrücken beschreiben allerdings nur die geplante (perfekte) Soll-Geometrie und spiegeln nicht etwaige Bautoleranzen oder bauliche Änderungen wider. Sind keine Ausführungspläne vorhanden oder ist deren Informationsgehalt ungenügend, ist ein manuelles Aufmaß erforderlich, welches sehr zeitintensiv und vor allem bei sich verändernden Querschnittsabmessungen nahezu unmöglich ist.

Die Nutzung von 3D-Punktwolken, welche die aktuell vorhandene Ist-Geometrie repräsentieren, löst diese Probleme. Die 3D-Punktwolken können dabei aus zwei grundlegend verschiedenen Aufnahmeverfahren entstehen:

- Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning (TLS): Die Geometrie der Oberfläche wird mittels Laserdistanzmessung erfasst und so in Punkte diskretisiert [15]. Die Dichte der Punkte ist dabei nicht zwangsläufig konstant; da die Winkeländerung bei der Messung im Messgerät konstant ist, liegen die Messpunkte auf der Oberfläche bei flacheren Auftreffwinkeln weiter auseinander.
- Punktwolken aus UAS-basierten Bildaufnahmen: Auf Grundlage von mittels UAS aufgenommenen Bilddaten wird über photogrammetrische Rekonstruktionsalgorithmen, wie z. B. die Methode *Structure-from-Motion* (SfM) [16], eine Punktwolke erzeugt. Um dabei ausreichend homologe Bildpunktpaare zwischen den Bildern zur Verfügung zu haben, ist dabei eine Überlappung der aufgenommenen Bildbereiche notwendig. Sofern

dieses Kriterium eingehalten wird, kann davon ausgegangen werden, dass im Gegensatz zu den TLS-basierten Punktwolken die rekonstruierten Punkte die Oberfläche mit einer konstanten Dichte auflösen.

Die beiden genannten Verfahren stehen dabei nicht im Widerspruch zueinander, sondern können auch sich jeweils ergänzend kombiniert werden [15]. Eine solche Kombination wurde auch für die weitere Betrachtung an der Maintalbrücke Gemünden genutzt.

Um auf Basis einer solchen (kombinierten) 3D-Punktwolke die Geometrie extrahieren und in ein Simulationsmodell überführen zu können, müssen alle Modelle, z.B. über eine Georeferenzierung, in einem gemeinsamen Referenzkoordinatensystem liegen. Bei der Transformation eines Simulationsmodells in das Referenzkoordinatensystem der Punktwolke stoßen automatisierte Algorithmen jedoch schnell an ihre Grenzen, da unter anderem nicht alle Elemente an der Oberfläche sichtbar sind, es sich bei der Punktwolke immer um einen verformten Zustand handelt und nicht alle sichtbaren Elemente auch in dem Simulationsmodell repräsentiert werden. Diese Problematik ist beispielhaft in Bild 3 dargestellt.



Bild 3 Beispielhafte Darstellung von möglichen Problemen bei der Georeferenzierung eines Simulationsmodells (hier FE-Modell in grün/schwarz) in das Referenzkoordinatensystem einer 3D-Punktwolke (grau); a) Ansicht eines Ausschnitts einer semi-integralen Brücke; b) Seitenansicht eines Pfeilers mit FE-Modell; c) Unterschied der Pfeilerachse zwischen beiden Modellen durch temperaturbedingte Verformung; d) Unterschied in berücksichtigten Tragwerksteilen; e) Unterschied durch visuell verdeckte Tragwerksbereiche

Quelle: Bauhaus-Universität Weimar

Example of possible problems with georeferencing a simulation model (here FE model in green/black) into the reference coordinate system of a 3D point cloud (grey); a) view of a section of a semi-integral bridge; b) side view of a pier with FE model; c) difference of the pier axis between both models due to temperature-related deformation; d) difference in the considered structural parts; e) difference due to visually obscured structural areas

Aufgrund des angesprochenen verformten Zustandes der Punktwolke kann die Geometrie nicht direkt in ein

Simulationsmodell übertragen werden, da bspw. sonst bei einer FE-Berechnung etwaige Spannungszustände vernachlässigt werden würden. Als praktikabel hat sich herausgestellt, die einzelnen Elemente entlang ihrer Bauteilachse in Scheiben zu schneiden, die Querschnittsgeometrie für jede Scheibe zu ermitteln, diese in eine unverformte Lage zu transformieren und anschließend in das entsprechende Simulationsmodell zu übertragen. Weitere Ausführen zu dieser Methodik können [7] entnommen werden. Die Ergebnisse der Geometrieextraktion zum Erstellen eines initialen Modells sind in Bild 4 dargestellt.



Bild 4 Aktualisierung der Querschnittsgeometrie am Beispiel des Überbaus der Maintalbrücke (grün: FE-Modell als 3D-Visualisierung und in Querschnittsrepräsentation; schwarz: 3D-Punktwolke aus UAS-basierter Aufnahme und TLS-Aufnahme im Inneren); a) initialer Querschnitt ohne Vorwissen der Geometrie, b) aktualisierte Geometrie des Überbaus

Quelle: Bauhaus-Universität Weimar

Updating of the cross-section geometry using demonstrated with the superstructure of the Maintalbrücke (green: FE model as 3D visualisation and as cross-section representation; black: 3D point cloud from UAS-based image acquisition and TLS data of the inside); a) initial cross-section without prior knowledge of the geometry, b) updated geometry of the superstructure.

4 Sonderinspektionen durch UAS-Befliegungen und Aufnahme von Schäden

Im Lebenszyklus eines Bauwerkes kann es, wie in Abschnitt 1 beschrieben, zu unvorhersehbaren Schadensereignissen kommen. An dieser Stelle kann ein kontinuierliches, sensorbasiertes Bauwerksmonitoring (siehe auch Abschnitt 7) einen Auslöser für eine visuelle Inspektion darstellen.

Nach Eintritt eines Schadensereignisses ist es notwendig, den Zustand des Tragwerks im Hinblick auf dessen Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu bewerten. Je nach Schädigungsart stehen zwei UASbasierte Varianten für eine Sonderinspektion zur Verfügung:

- Zum einen kann eine erneute Komplettaufnahme des Bauwerks inklusive photogrammetrischer Rekonstruktion erfolgen. So kann, wie in Abschnitt 3 beschrieben, eine Aktualisierung der Geometrie eines Simulationsmodells erfolgen. Hauptaugenmerk der Auswertung liegt in diesem Fall jedoch auf der Ermittlung der verformten Bauteilachse. Diese kann mit einem vorher aufgenommenen Referenzzustand verglichen werden, sodass die Biegelinie des Tragwerks berechnet werden kann. Bei bekannter Laständerung (z. B. Temperaturänderung) können mithilfe der Biegelinie Steifigkeitsänderungen im Tragwerk, welche die Schädigung repräsentieren, nach [7] ermittelt werden.
- 2. Das zweite Einsatzgebiet einer UAS-basierten Sonderinspektion ist eine einfache und schnelle visuelle Überprüfung von schwer zugänglichen Tragwerksteilen. So können von Bereichen, in denen eine Schädigung erwartet wird, Bilder in hoher Auflösung aufgenommen werden, mit dem Ziel der Kennzeichnung von Anomalien im Bild bei gleichzeitiger Klassifizierung der Schadensart (z. B. Riss, Abplatzung usw.). Da eine manuelle Auswertung der Bilddaten aufwändig und zeitintensiv ist, werden an dieser Stelle vorab trainierte künstliche neuronale Netzwerke angewandt [17]. Die im Bild erkannten und markierten Schäden können anschließend anhand der bekannten Kameraposition und –orientierung auf die Oberfläche des rekonstruierten Modells projiziert werden.

Die UAS-Flugroute zur Aufnahme der Bilddaten muss, vor allem für den zweiten Anwendungsfall, zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Auflösung der Bilddaten und Distanz zum Bauwerk an der tatsächlich vorhandenen Geometrie erfolgen. Dazu kann ein nach Abschnitt 3 initial erstelltes Geometriemodell genutzt werden. Da sich die Flugrouten beider Sonderinspektions-Varianten lediglich in der Flugzeit, dem aufzunehmenden Bereich des Tragwerks sowie der Distanz zum Bauwerk und der damit verbundenen Auflösung der Oberfläche unterscheiden, können beide

Aufnahmekampagnen miteinander kombiniert werden [18]. Ein Ausschnitt einer Flugroute zur Aufnahme eines Detailbereiches an der Maintalbrücke Gemünden ist in Bild 5 gezeigt.



 Bild 5
 Bildbasiert erzeugte 3D-Punktwolke mit Position und Orientierung des UAS; a) Aufnahme zur Erzeugung eines (initialen)

 Geometriemodells; b)
 Detaillierte Aufnahme eines Pfeilerbereichs während einer Sonderinspektion zur automatisierten Erkennung von

 Oberflächenschäden
 Detaillierte Aufnahme eines Pfeilerbereichs während einer Sonderinspektion zur automatisierten Erkennung von

Quelle: Bauhaus-Universität Weimar

Image-based reconstructed 3D-point cloud with position and orientation of the UAS; a) data acquisition to generate an (initial) geometry model; b) detailed data acquisition of a pier during a special inspection for the automated detection of surface damages

5 Sensorbasiertes Bauwerksmonitoring

Die Auslegung der Datenerfassung durch ein sensorbasiertes Bauwerksmonitoring der Maintalbrücke Gemünden erfolgte im Rahmen einer fachlichen Planung, die die bauwerksspezifischen Problem- und Aufgabenstellungen einbezogen sowie die Ziele des Monitorings, die Verkehrseinwirkungen und Umgebungsbedingungen berücksichtigt hat. An der Maintalbrücke wurden fünf Monitoringmaßnahmen definiert und umgesetzt, vgl. [8]. Das Monitoring an der Maintalbrücke Gemünden erfasst die Schwingungscharakteristik zur dynamischen Schadensdetektion, das Neigungsverhalten des Überbaus zur statischen Schadensdetektion, Betondehnungen an den höchst beanspruchten Positionen zur Ermittlung von Schnittkräften und Gleisschwellenerschütterungen, um den überfahrenden Zugverkehr zu erkennen und zu charakterisieren. Da die Umweltbedingungen einen großen Einfluss auf das Bauwerksverhalten haben [19], werden Bauwerks- und Umgebungstemperaturen miterfasst. Die für diesen Beitrag relevante Sensorik ist in Bild 6 dargestellt. Alle Messungen dienen weiterhin als Gesamtdatenbestand für die in diesem Beitrag in Teilen vorgestellte probabilistische Systemidentifikation. Ziel ist es, immer eine möglichst hohe Datenqualität, vgl. [20], zu erreichen, gemessen an den gestellten Anforderungen.



Bild 6 Ansicht der Strombrücke mit Neigungssensoren und vertikalen Geophonen

```
Quelle: Patrick Simon/BAM
```

Elevation of the main bridge with inclination sensors and vertical geophones.

6 Digitales Bauwerksmodell für das Bauwerksmonitoring

Die Anforderungen an die Modellierung des Tragverhaltens leiten sich von der Verwendung des Modells ab. Im aktuellen Projekt soll das Modell zur Identifikation von Veränderungen des Tragverhaltens der Maintalbrücke Gemünden anhand von kontinuierlich gemessenen dynamischen und statischen Daten und quasi-statischen Daten aus Belastungsfahrten genutzt werden. Aus diesem Grund wurde die Brücke linear-elastisch mit Schalenelementen modelliert. Voruntersuchungen ergaben, dass der Hauptträger allein nicht die hohe Torsionssteifigkeit erklären kann. Daher wurden die Kappen als Balkenelemente modelliert und mit Federelementen an die Außenkanten der Hauptträger gekoppelt. Die Auflager der Randfelder und Betongelenke wurden mit für Translation steifen und für Rotation weichen Federelementen modelliert. Bestandsunterlagen dienten als Grundlage für die Erstellung des Modells, was in 86 Schnitten mit definierter Geometrie resultiert, siehe Bild 7.



Bild 7 FE-Modell der Maintalbrücke Gemünden. Die Linien markieren nicht Elemente, sondern Abschnitte mit definierten geometrischen Eigenschaften Quelle: Patrick Simon/BAM

Finite element model of the Maintalbrücke Gemünden. The lines do not signify finite elements but sections with specified geometric attributes.

7 Kalibrierung des Bauwerksmodells durch dynamische Monitoringdaten

Für die Zustandsermittlung und -bewertung inklusive detaillierter Schadensidentifikation sind numerische Simulationsmodelle nötig, die in ihren Parametern anhand gemessener Bauwerksdaten kalibriert sind und so das reale Tragwerk adäquat wiedergeben [9, 10, 21]. In diesem Beitrag ist das FE-Modell des Bauwerks Teil einer probabilistischen Modellklasse [21], wobei die Modellparameter θ ; die die Eigenschaften des Bauwerks widerspiegeln, als Zufallsvariablen aufgefasst werden. Die gemeinsame *a-priori* (*engl.: prior*) Verteilung der Modellparameter $p(\theta)$ zusammen mit dem FE-Modell quantifizieren das Vorwissen und die Annahmen hinsichtlich des Tragverhaltens der Brücke. Diese werden anhand der vorhandenen Bauwerksdaten und der Literatur [22] getroffen. Dabei werden die E-Moduln des Betons in fünf Abschnitten, die Steifigkeit und Wichte der Kappen sowie die Steifigkeit des Schubverbunds zwischen Hauptträger und Kappen, die Wichte des Schotterbetts und die Auflagersteifigkeiten an den Stützen als Parameter formuliert.

Das Vorwissen wird durch die am realen Tragwerk erfassten Daten aktualisiert. Im hier beschriebenen Beispiel werden anhand der gemessenen Vibrationsdaten die dynamischen Eigenschaften der Maintalbrücke Gemünden mit Methoden der operativen Modalanalyse bestimmt. Die identifizierten Eigenfrequenzen und Modalformen werden im Folgenden als Daten \mathcal{D} bezeichnet.

Die Diskrepanzen zwischen den identifizierten und vorhergesagten dynamischen Eigenschaften sind die sogenannten Vorhersagefehler, die die bestehenden Mess- und Modellunsicherheiten abbilden. Hierbei beschreibt $e_{\lambda} = \ln \hat{\lambda} - \ln \lambda(\theta)$ den Unterschied zwischen den Logarithmen der identifizierten Eigenwerte $\hat{\lambda} = (2\pi \hat{f})^2$ und den vorhergesagten Eigenwerten $\lambda(\theta)$ und $e_{\phi} = \hat{\phi} - \phi(\theta)$ die Abweichungen zwischen den Komponenten der identifizierten Modalformen $\hat{\phi}$ und der vorhergesagten Modalformen $\phi(\theta)$.

Die einzelnen Vorhersagefehler werden als normalverteilte Zufallsvariablen mit einem Mittelwert von 0 modelliert. Die probabilistischen Modelle der Vorhersagefehler orientieren sich an der existierenden Literatur [10, 23]. Die Verbindung zwischen den Modellparametern $\boldsymbol{\theta}$ und den Daten \mathcal{D} wird probabilistisch über die Likelihood-Funktion $L(\boldsymbol{\theta}|\mathcal{D})$ hergestellt. Diese wird anhand der Modelle der Vorhersagefehler formuliert. Die konkrete Herleitung der Likelihood-Funktion erfolgt nach etablierten Ansätzen [10, 23].

Das Vorwissen über die Modellparameter, welches durch ihre a-priori Verteilung $p(\theta)$ quantifiziert wird, und die Daten \mathcal{D} werden probabilistisch durch die Anwendung des Satzes von Bayes kombiniert:

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathcal{D}) = \frac{L(\boldsymbol{\theta}|\mathcal{D}) \, p(\boldsymbol{\theta})}{\int_{\boldsymbol{\theta}} L(\boldsymbol{\theta}|\mathcal{D}) \, p(\boldsymbol{\theta}) \, \mathrm{d}\boldsymbol{\theta}}$$

Als Ergebnis erhält man die aktualisierte bzw. *a-posteriori* (*engl.: posterior*) Verteilung der Modellparameter $p(\theta|D)$, die die relativen Plausibilitäten der Parameterwerte bedingt auf die Daten quantifiziert. Der Satz von Bayes wird hier numerisch gelöst [24]. Dabei werden durch das parametrisierte FE-Modell die Eigenfrequenzen und -formen vorhergesagt. Aus der Diskrepanz zwischen diesen Vorhersagen und den Messungen werden plausible Parameterwerte abgeleitet.

Die gemessenen Vibrationsdaten – hier bestehend aus 11 Datensätzen unter ambienter Anregung – werden mittels der Stochastic Subspace Identification (SSI) Methode analysiert. In Bild 8 sind die identifizierten Eigenfrequenzen der Datensätze dargestellt.



Bild 8 Identifizierte Eigenfrequenzen der Datensätze, die als Grundlage der Modellaktualisierung dienen.

Quelle: Patrick Simon/BAM

Identified modal frequencies of the datasets providing the basis for the model updating.

Die Güte der Modellaktualisierung wird zunächst überprüft, indem die vorhergesagten Eigenfrequenzen und Modalformen mit den identifizierten verglichen werden. Dabei werden hier jeweils die Mittelwerte der marginalen apriori und der a-posteriori Parameterverteilungen benutzt. Die größten Änderungen ergeben sich in den Betonsteifigkeiten, wobei diese in der Mitte der Brücke am höchsten sind. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass bei vorgespannten Betonbrücken häufig höhere Frequenzen als die vorab vorhergesagten gemessen werden. Mögliche Gründe hierfür sind die Streubreite der E-Moduln und Effekte der Vorspannung. In Tab. 1 werden die beobachteten Modalformen und Eigenfrequenzen mit den jeweiligen Modellvorhersagen verglichen. Dabei werden die Beobachtungen geclustert und die mittlere Frequenz sowie der durchschnittliche MAC-Wert der jeweiligen Cluster

gezeigt. Bei den Vorhersagen werden ebenso die durchschnittlichen MAC-Werte angegeben. Die Anpassungsgüte verbessert sich deutlich bei den Eigenfrequenzen, aber nicht bei den Modalformen. In der weiteren Vertiefung empfiehlt sich deswegen ein Modellklassenvergleich [21] über verschiedene FE-Modellierungen, Parametrisierungen und Formulierungen der Likelihood-Funktionen.

Observed modes in comparison with model predictions from prior and posterior model parameters.

| Beobachtung | | | A-priori Vo | A-priori Vorh. | | A-posteriori Vorh. | |
|---------------------------------------|--------|------|-------------|----------------|--------|--------------------|--|
| Modalform in vertikaler Richtung | f [Hz] | MAC | f [Hz] | MAC | f [Hz] | MAC | |
| | 1,96 | 1,00 | 1,69 | 0,99 | 1,99 | 0,99 | |
| 1. vert. Biegeschwingung HF | | | | | | | |
| | 3,00 | 0,98 | 2,56 | 0,98 | 2,93 | 0,97 | |
| 1. vert. Biegeschwingung NF symmetr. | | | | | | | |
| | 3,44 | 0,99 | 2,85 | 0,72 | 3,26 | 0,77 | |
| 1. vert. Biegeschwingung NF antimetr. | | | | | | | |
| | 5,60 | 0,95 | 3,73 | 0,93 | 5,29 | 0,96 | |
| 1. Torsionsschwingung Hauptfeld | | | | | | | |
| | 7,49 | 0,88 | 5,73 | 0,86 | 7,63 | 0,86 | |
| 3. vert. Biegeschwingung HF | | | | | | | |
| : | 7,88 | 0,91 | 5,79 | 0,90 | 7,74 | 0,80 | |

^{2.} vert. Biegeschwingung NF symmetr.

Tab. 1
 Beobachtete Moden im Vergleich mit den Modellvorhersagen anhand der a-priori und a-posteriori Modellparameter.

9.14

0.63

2. vert. Biegeschwingung NF antimetr.

8 Validierung des Bauwerksmodells durch Belastungsfahrten

8.92

Die Durchführung von quasi-statischen Belastungsfahrten über die Maintalbrücke Gemünden verfolgt mehrere Ziele:

0.90

- Entwicklung und Erprobung von speziellen Methoden zur Identifikation von Veränderungen des Tragverhaltens mittels wiederkehrender Messung von Einflusslinien [11],
- Vergleich mit den Daten aus den Belastungsfahrten, die vor der Inbetriebnahme der Brücke durchgeführt wurden [14] und
- Messen von quasi-statischen Daten (v. a. Verformungsdaten), die zusätzlich zu den kontinuierlich gemessenen Daten f
 ür eine probabilistische Systemidentifikation bzw. Modellkalibrierung und eine anschließende Identifikation von Ver
 änderungen des Tragverhaltens mit probabilistischen Methoden verwendet werden [9].

Eine Reihe solcher Belastungsfahrten fand im Mai 2021 statt. Hierbei kam eine Lok der Baureihe 120 mit einer Gesamtlast von 82,3 t zum Einsatz. Die Position der Lok wurde über ein Globales Navigationssatellitensystem (GNSS), bestehend aus Rovereinheit und Basisstation, erfasst (siehe Bild 9). Nach dem Wissen der Autoren ist dies die erstmalige Verwendung eines solchen Systems für diesen Einsatzzweck. Da hier keine Erfahrungen über die Zuverlässigkeit und Genauigkeit vorliegen, wurde die Position zusätzlich tachymetrisch erfasst. Der Vergleich zeigt, dass die Positionsbestimmung über GNSS zuverlässig ist und die relative Position zwischen Basisstation und Rovereinheit Genauigkeiten von 1-2 cm aufweist.



Bild 9 Prinzipskizze des GNSS-Positionierungssystems Quelle: Ralf Herrmann, Patrick Simon/BAM Schematic sketch of the GNSS positioning system

Aus den synchronisierten Zeitschrieben der Neigungssensoren und der Lokposition können die Einflusslinien der Überbaurotationen an den Sensorpositionen bestimmt werden. Für die Validierung des kalibrierten Bauwerksmodells aus Abschnitten 6 und 7 wird eine gemessene Einflusslinie der Längsneigung des Überbaus in Achse 7b neben einer der V-Stützen mit den Modellvorhersagen für die mittleren a-priori und a-posteriori Parameter verglichen (siehe Bild 10). Hier zeigt sich, dass die a-posteriori Vorhersagen zwar näher an der Messung liegen, aber noch deutlich von der Messung entfernt sind. Das reale Tragwerk ist für quasi-statische Belastungen immer noch steifer als das bereits aktualisierte FE-Modell.



Bild 10 Vergleich von Einflusslinien der Längsneigung an Überbauachse 7b

Quelle: Patrick Simon/BAM

Comparison of influence lines of the longitudinal rotation in axis 7b

9 Zusammenfassung und Ausblick

Als Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen des Managements von Infrastrukturbauwerken wurde im AISTEC-Projekt ein Konzept zur Bewertung alternder Infrastrukturbauwerke mit digitalen Technologien entwickelt, das sensor- und bildbasierte Verfahren für ein Bauwerksmonitoring und eine Bauwerksdiagnose beinhaltet. Im Rahmen dieses Beitrags wurden anhand der Maintalbrücke Gemünden UAS-Befliegungen zur Erstellung von Geometriemodellen und zur Anomalieerkennung sowie ein kontinuierliches, sensorbasiertes Monitoring und eine anschließende Modellkalibrierung anhand der Monitoringdaten inklusive Messfahrten zur Modellvalidierung vorgestellt. Eine weiterführende Beschreibung der Methoden zur Diagnose, insbesondere wie erkannte Anomalien in den Geometriemodellen gespeichert werden, waren im Umfang dieses Beitrags nicht abzubilden. An dieser Stelle sei auf andere bestehende und künftige Veröffentlichungen zu diesem Projekt hingewiesen [5, 6, 17, 25].

Die Kalibrierung des Bauwerksmodells anhand von dynamischen Monitoringdaten erhöht dessen Güte ersichtlich. Das Modell bildet perspektivisch die Grundlage für eine Anomalieerkennung und Zustandsbewertung sowie weitere Methodenerprobungen. In weiteren Schritten muss die Modellkalibrierung verfeinert werden, um die asymmetrischen Modalformen und Nichtliniearitäten bei den Überfahrten besser abbilden zu können. Zusätzlich müssen die quasistatischen Daten aus den Belastungsfahrten und der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Tragverhalten und die Monitoringdaten bei der Modelkalibrierung berücksichtigt werden [9].

Die mit den vorgestellten Methoden periodisch oder kontinuierlich identifizierten Tragwerkseigenschaften können die Möglichkeit bieten, Veränderungen zu detektieren. Für eine Optimierung der Instandhaltungsplanung ist aus Sicht der Autoren eine Integration von Schadensszenarien und -modellen unerlässlich [2-4].Während die separate Anwendung der sensor- und bildbasierten Methoden vielversprechende Ergebnisse zeigen, besteht noch Forschungsbedarf hinsichtlich einer stärkeren Integration beider Verfahren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Kolleginnen und Kollegen von BAM, Bauhaus-Universität Weimar und DB für die Organisation, Durchführung und Auswertung von Belastungsfahrten, UAS-Befliegungen und kontinuierlichem Monitoring und darüber hinaus für die Unterstützung der Projektpartner von LAP und des Projektträgers VDI-TZ. Das Verbundvorhaben AISTEC wurde ermöglicht durch die Förderung des BMBF, Förderkennzeichen 13N14657 bis

13N14660.

Literatur

- [1] W. Schulz, M. Mainka, *Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Sperrung der A1-Rheinbrücke für den Lkw-Verkehr*, Pro Mobilität – Initiative für Verkehrsinfrastruktur e.V., Köln, 2013.
- [2] M. Farhan, R. Schneider, S. Thöns, Predictive information and maintenance optimization based on decision theory: a case study considering a welded joint in an offshore wind turbine support structure, *Structural health monitoring*, 2021.
- [3] A. Kamariotis, D. Straub, E. Chatzi, Optimal maintenance decisions supported by SHM: A benchmark study, *IALCCE 2020: The Seventh International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*, 2021.
- [4] D. Zonta, D. Tonelli, A. Verzobio, F. Poli, Deciding based on SHM, 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 10, Porto, Portugal, 2021.
- [5] N. Hallermann, M. Helmrich, G. Morgenthal, E. Schnitzler, V. Rodehorst *et al.*, UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken, *Bautechnik*, **95**(10), 720-726, 2018.
- [6] G. Morgenthal, N. Hallermann, J. Kersten, J. Taraben, P. Debus *et al.*, Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges, *Automation in Construction*, **97**, 77-95, 2019/01/01/, 2019.
- [7] M. Helmrich, G. Morgenthal, "Structural parameter identification from image-based acquired information," *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*, pp. 166-172: CRC Press, 2021.
- [8] R. Herrmann, R. Schneider, P. Simon, F. Hille, S. Said *et al.*, Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung, *11. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen (SEUB)*, 2021.
- [9] P. Simon, R. Schneider, M. Baeßler, Bayesian system identification of a reinforced concrete beam subject to temperature variations based on static response data, *IABMAS 2020, 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Sapporo, Japan,* 2021.
- [10] P. Simon, R. Schneider, E. Viefhues, S. Said, R. Herrmann *et al.*, Vibration-based Structural Health Monitoring of a Reinforced ConcreteBeam Subject to Varying Ambient Temperatures using Bayesian Methods, *EURODYN 2020, XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece*, 2020.
- [11] S. Stöhr, M. Link, R. Rohrmann, W. Rücker, Damage detection based on static measurements on bridge structures, 24th IMAC International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics, 2006.
- [12] F. Leonhardt, Mainbrücke Gemünden-Eisenbahnbrücke aus Spannbeton mit 135 m Spannweite, *Beton-und Stahlbetonbau*, **81**(1), 1-8, 1986.
- [13] G. Schacht, S. Marx, Unbewehrte Betongelenke 100 Jahre Erfahrung im Brückenbau, *Beton- und Stahlbetonbau*, **105**(9), 599-607, 2010.
- [14] Deutsche Bundesbahn Versuchsanstalt München, Dynamische Messungen an der Maintalbrücke bei Gemünden in km 291,411 der NBS Hannover Würzburg unter einem Versuchszug und unter einem Schotterzug, 1989.
- [15] T. Luhmann, M. Chizhova, D. Gorkovchuk, Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia, *Drones*, **4**(3), 53, 2020.
- [16] J. L. Schönberger, J.-M. Frahm, Structure-from-motion revisited, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016.
- [17] C. Benz, P. Debus, H. K. Ha, V. Rodehorst, Crack segmentation on UAS-based imagery using transfer learning, 2019 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), 2019.
- [18] P. Debus, V. Rodehorst, Multi-scale Flight Path Planning for UAS Building Inspection, *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2020.
- [19] M. Baeßler, F. Hille, A study on diverse strategies for discriminating environmental from damage based variations in monitoring data, *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges: Proceedings of the Ninth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2018), Melbourne, Australia, 2018.*
- [20] R. Herrmann, J. Rabe, G. Bolle, S. Marx, Konzepte für Datenqualität und Datenablage bei Entwurf und Umsetzung von Monitoringsystemen, *Bauingenieur* **92**(12), 537-545, 2017.
- [21] J. L. Beck, Bayesian system identification based on probability logic, *Structural Control and Health Monitoring*, **17**(7), 825-847, 2010.
- [22] Joint Committee on Structural Safety, (JCSS), Probabilistic Model Code, 2001.
- [23] F.-L. Zhang, S.-K. Au, Fundamental two-stage formulation for Bayesian system identification, Part II: Application to

ambient vibration data, Mechanical Systems and Signal Processing, 66, 43-61, 2016.

- [24] D. Straub, I. Papaioannou, Bayesian updating with structural reliability methods, *Journal of Engineering Mechanics*, **141**(3), 2014.
- [25] J. Taraben, M. Helmrich, G. Morgenthal, Datenmodelle für digitale Zwillinge von Brücken und bildbasierte Zustandsaufnahmen (Akzeptiertes Manuskript), *Bautechnik*, **n**/a(n/a), 2022.

Autoren

Patrick Simon, M. Sc. (Korrespondenzautor) <u>patrick.simon@bam.de</u> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Fachbereich 7.2 Ingenieurbau Unter den Eichen 87 12205 Berlin

Marcel Helmrich, M. Sc.

marcel.helmrich@uni-weimar.de

Bauhaus-Universität Weimar Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Marienstraße 13 99423 Weimar

Dr.-Ing. Ralf Herrmann

ralf.herrmann@bam.de Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Fachbereich 7.2 Ingenieurbau Unter den Eichen 87 12205 Berlin

Dr.-Ing. Ronald Schneider

ronald.schneider@bam.de Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Fachbereich 7.2 Ingenieurbau Unter den Eichen 87 12205 Berlin

Dr.-Ing. Matthias Baeßler matthias.baessler@bam.de Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Leiter Fachbereich 7.2 Ingenieurbau Unter den Eichen 87 12205 Berlin

Dipl.-Geol. Salvatore Lorelli Salvatore.lorelli@deutschebahn.com DB Netz AG Maschinentechnische Anlagen (I.NAI 4462) Adam-Riese-Straße 11-13, 60327 Frankfurt am Main

Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing. Guido Morgenthal guido.morgenthal@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Marienstraße 13 99423 Weimar