Validierung an Brückenüberbauten





Validierung an Brückenüberbauten Modalbasiertes Monitoring System Applikationsnote



Motivation und Ziel

Die steigende Beanspruchung von Infrastrukturbauwerken sorgt zunehmend für die Herausforderung, den Bauwerksbestand im Hinblick auf die Sicherheit und die daraus resultierende Restnutzungsdauer zu untersuchen und zu bewerten. Um die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit gewährleisten zu können, sind zuverlässige, technisch gut umsetzbare und trotzdem ökonomische Lösungen zur messtechnischen Überwachung nötig. Dies ist die zwingende Voraussetzung, um in sinnvoller Art und Weise Informationen über Schädigungsprozesse und aktuelle Bauwerkseigenschaften zu erhalten.

Ein messtechnisches Lösungsmodell eines modalbasierten Monitoring Systems für Brückenüberbauten wird am KIT (Karlsruher Institut für Technologie), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie Abteilung Massivbau im Rahmen des ZIM-Kooperationsprojektes "Entwicklung einer Systematik zur modalbasierten Schädigungsanalyse und Überwachung von Brückenüberbauten" entwickelt. Brücken weisen bei Anregung, wie alle Strukturen, ein charakteristisches Schwingverhalten auf, welches durch modale Parameter wie Eigenfrequenzen und Eigenformen beschrieben werden kann.

Die grundlegende Überlegung für ein modalbasiertes Monitoring System ist, dass Schädigungsprozesse einhergehen mit Steifigkeitsveränderungen der Struktur, die wiederum zu messbaren Veränderungen in den modalen Parametern führen. Die modalen Parameter, Eigenfrequenzen und Eigenformen können messtechnisch erfasst und charakterisiert werden, um fundierte Informationen über den Brückenzustand, deren Tragfähigkeit und die Restnutzungsdauer zu gewinnen.

Aufbau

Für die experimentelle Überprüfung und Erprobung eines modalbasierten Monitoring Systems wurden Bauteilversuche in der Materialprüfungsund Forschungsanstalt Karlsruhe unter der Leitung von Mareike Kohm durchgeführt. Ein 6,5 m langer Stahlbetonbalken, der beidseitig gelenkig gelagert wurde, diente als Brückenersatzmodell. Der Stahlbetonbalken war zu Beginn des Experiments noch intakt und wurde im Laufe der Untersuchungen durch einen weggesteuerten Kraftzylinder schrittweise geschädigt, (Abbildung 1). Durch die zentrische Biegezugbelastung des Stahlbetonbalkens kam es zu einer zunehmenden Rissbildung, die zur Auswertung manuell und mit dem optischen Messsystem GOM Aramis dokumentiert wurde.

Zur messtechnischen Erprobung und Verifikation der modalen Parameter wurden an 25 Messstellen die Beschleunigungs-Zeitverläufe mit MEMS-basierten Beschleunigungsaufnehmern der Firma Semex-Engcon aufgenommen. Um die messtechnischen Ergebnisse der Beschleunigungsaufnehmer zu überprüfen und zu verifizieren, kam mit 27 Messköpfen an vier Optikeinheiten, für die gleichen 25 Messstellen und zwei zusätzliche Messstellen an den Auflagerachsen, das MPV Multipoint Vibrometer von Polytec zum Einsatz. Das MPV misst Schwingungen berührungslos und basiert auf dem Prinzip der Laser-Doppler-Vibrometrie. Jede Optikeinheit des MPV enthält acht Messköpfe, die simultan Messdaten erfassen können. Auf diese Weise ist das MPV insbesondere für nicht-wiederholbare Ereignisse, wie bei Schädigungen, einsetzbar. Zudem wurden zwei Fabry-Perot Fasersensoren (OS) von Luna Technologies (Vertrieben durch Polytec) als Beschleunigungsaufnehmer, zur zusätzlichen Überprüfung der Messdaten verwendet.

Angeregt wurde der Balken an zwei Positionen mit einem einfachen manuellen Gummihammer. Die Ermittlung der modalen Parameter erfolgte anschließend mit Hilfe der Frequency Domain Decomposition Methode. Diese Methode gehört zu den Verfahren der Operational Modal Analysis, bei der die modalen Parameter allein auf Basis der Antwortschwingungen der Struktur geschätzt werden. Auf diese Weise müssen die Erregungskräfte nicht messtechnisch erfasst werden. Übertragen auf reale Brückenbauwerke bedeutet dies, dass die natürlichen nicht messbaren Erregungsquellen wie z.B. Verkehr, Wind und Mikrobeben genutzt werden können und es somit zu keiner Beeinträchtigung des Verkehrs während der Monitoringmaßnahme kommt.

Auf Abbildung 1 und 2 ist die Positionierung der Sensoren auf dem Stahlbetonbalken zusehen.



Belastung durch den Kraftzylinder (Mitte), MPV Laser-Messköpfe (oben) und MEMS Sensoren (grün auf dem Stahlbetonbalken)



Versuchsaufbau: MPV Laser-Messköpfe (oben befestigt am Bosch-Stativ) und **MEMS-Sensoren** (grün auf dem Stahlbetonbalken verschraubt)

3

5 Belastung des Stahlbetonbalkens

4

Anregung mit

dem Gummi-

on 1 (Maximum

des Schwingungsbauches der 2.

hammer an Anregungspositi-

Eigenform)

Die 27 MPV-Messköpfe waren auf die Oberseite des Stahlbetonbalkens ausgerichtet (s. Abbildung 3) und an mehreren zusammengesetzten Bosch-Profilen befestigt. Alle 27 Messköpfe der vier Optikeinheiten liefen im 1D-Betrieb. Die OS waren an zwei seitlichen Messstellen auf Höhe der MEMS-Sensoren befestigt. Für den Vergleich und die Verifikation der MEMS mit dem MPV-System mussten alle Messpunkte für jedes System synchron erfasst werden. Genau für diese Aufgabenstellung wurde das MPV Multipoint Vibrometer entwickelt, das dank der synchronen Messdatenerfassung bis zu 48 Kanäle gleichzeitig erfassen kann.

2



Versuchsdurchführung

Mit den drei Messsystemen MPV, MEMS und OS wurden bei einer definierten Triggerschwelle zehn Messungen pro Position aufgenommen. Die Messzeit betrug 15s, um das Abklingen der Schwingung im Zeitbereich zu erfassen. Die erste Messreihe pro Anregungspunkt (Pos1 und Pos2) erfolgte vor der ersten Belastung durch den Kraftzylinder.

Diese Messung wurde als ungeschädigter Referenzzustand angesehen und wird im weiteren Verlauf als BE00 bezeichnet. Nach jeder gesamten Messreihe an beiden Anregungspositionen wurde der Stahlbetonbalken mit einem Kraftzylinder, der sich in der Mitte des Versuchsbalkens befand, be- und wieder entlastet. Die Anregung des Versuchsbalkens mit dem Gummihammer erfolgte immer im entlasteten Zustand. So wurden 16 Belastungsstufen bis zum Versagen des Stahlbetonbalkens aufgenommen.

Auswertung

Mit dem MPV konnten schon zu Beginn nach der ersten Messung (BE00: Messung im unbeschadeten Zustand) sowohl die Messdaten im Zeit- als auch im Frequenzbereich mit den Resonanzfrequenzen und den dazugehörigen Schwingformen in der MPV-Software grafisch angezeigt werden.

Mit den anderen beiden Messsystemen war eine grafische Anzeige der Antwortspektren und der Eigenformen vor Ort nicht möglich. Diese konnten erst im Nachhinein ausgewertet werden.

Auf Abbildung 6 ist für BE00 die Zeitmessung zu sehen. Abbildung 7, 8 und 9 zeigen für BE00 die erste bis dritte Eigenform (1. Eigenfrequenz 11 Hz, 2. Eigenfrequenz 45 Hz, 3. Eigenfrequenz 92 Hz).

Vergleich der Eigenfrequenzen zwischen MPV und MEMS mit der Frequency Domain Decomposition (FDD) Methode

Hierfür wurden zum einen die Beschleunigungszeitverläufe (ermittelt mit den MEMS-Sensoren) verwendet und zur Validierung die Geschwindigkeitszeitverläufe (ermittelt mit dem MPV) herangezogen. Eine Erfassung der Eigenformen war mit nur zwei OS Punkt-Sensoren nicht möglich. Der Vergleich der drei Sensorsysteme erfolgt im nächsten Abschnitt anhand der ermittelten Eigenfrequenzen über die FFT.

Für den Vergleich der beiden Sensorsysteme wurden die Messdaten der jeweiligen Messungen innerhalb einer Messreihe für jede Belastungsstufe und Anregungsposition zunächst verglichen und dann gemittelt. Aus den mit den MEMS Sensoren ermittelten Eigenformen konnten die Krümmungen der Eigenformen ermittelt werden. Diese ermöglichten die Feststellung und Lokalisierung der zunehmenden Rissbildung des Stahlbetonbalkens. Der durch den Kraftzylinder hervorgerufene Schädigungsprozess (zunehmende Rissbildung) konnte bereits ab dem Öffnen des ersten Risses mit Hilfe der modalen Parameter detektiert werden.

Auf Abbildung 10, 11 und 12 ist der Verlauf der Eigenfrequenzen über die jeweiligen Belastungsstufen (BE) dargestellt. Die blauen Kurvenverläufe zeigen die Eigenfrequenzen, die mit dem MPV-System ermittelt wurden, die roten gehören zu den MEMS-Sensoren.. Der Vergleich der Eigenfrequenzen zwischen MPV und den MEMS-Sensoren. zeigt einen deckungsgleichen Verlauf über den Belastungsstufen, insbesondere bei der zweiten und dritten Eigenfrequenz. Die berührungslose Messmethode ist also, neben ihren Vorteilen in der einfachen Handhabung messtechnisch ebenso geeignet wie die klassische Sensorik. Die Streuungen bei der ersten Eigenfrequenz (Abbildung 10) können auf die materialbedingten Nichtlinearitäten des Stahlbetons zurückgeführt werden. Da die Schwingungsamplituden der ersten Eigenform am größten sind, ist der Einfluss des verformungsabhängigen nichtlinearen Verhaltens des Betons hier am größten.

Das MPV zeigt bei den ersten Belastungsstufen zwischen Position 1 und Position 2 jedoch einen nahezu deckungsgleichen Verlauf in den ersten Belastungsstufen. während die Unterschiede der MEMS-Sensoren etwas stärker in diesem Bereich streuen. Da der Einfluss der Nichtlinearitäten bei geringem Schadensniveau am größten ist, nimmt die Streuung mit steigender Belastung ab. Beispielsweise ist die Streuung der ersten Eigenfrequenz nur bis zur 6. Belastungsstufe bemerkbar, danach ist die Streuung nur noch sehr gering. Beide Sensorsysteme zeigen auch einen signifikanten Anstieg der ersten Eigenfrequenz bei Beginn des Fließens der Bewehrung bei Belastungsstufe BE15. Bei der ersten Eigenfrequenz ist im Verlauf der MPV und MEMS-Sensoren jedoch auch ein Plateau zu sehen, das so nicht erwartet wurde. Erwartet wurde vielmehr eine kontinuierliche Frequenzabnahme wie bei der zweiten und dritten Eigenfrequenz.

Vergleich der Eigenfrequenzen zwischen MPV, MEMS und OS mit der FFT Methode

Um auch die zwei OS Sensoren vergleichen zu können, wurde noch eine andere Art der Datenauswertung verwendet: Aufgrund der geringen Anzahl an OS Sensoren, konnten die modalen Parameter nicht mit Hilfe der Frequency Domain Decomposition Methode geschätzt werden. Daher wurden die Eigenfrequenzen mit Hilfe der FFT ermittelt. Daher sind im Folgenden für die Frequenz der ersten Eigenmode die Ergebnisse dargestellt, die mittels einer einfachen FFT ausgewertet wurden.

Im Gegensatz zur Frequency Domain Decomposition Auswertung des MPV und der MEMS-Sensoren zeigt eine FFT-Auswertung bei der ersten Eigenfrequenz kein Plateau für die Belastungsstufen 9-14, sondern einen leichten Abfall. Die Ursachen sind noch unklar. Dieses Verhalten tritt bei allen Sensortypen auf, hängt also nicht von der Sensorik ab, sondern eher von der Analyse der Daten. Die Ergebnisse der zweiten und dritten Eigenfrequenz des jeweiligen Sensorsystems sind jedoch nahezu deckungsgleich, unabhängig vom Berechnungsverfahren.

Alle drei Sensoriken zeigen auch bei dieser Art der Auswertung einen sehr ähnlichen Verlauf.



Fazit

Insgesamt sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Sensorarten festzustellen. Damit konnte das MPV Multipoint Vibrometer als Verifikationsinstrument die Ergebnisse der MEMS-Sensoren (Monitoring System) bestätigen. Das MPV bietet also eine Möglichkeit, die gleiche Messgenauigkeit wie berührende Sensorik zu erhalten, zudem ist sie berührungslos und flexibel.



10 Vergleich der 1. Eigenfrequenz



11 Vergleich der 2.Eigenfrequenz



12 Vergleich der 3. Eigenfrequenz





Zukunft seit 1967

Hightech für Forschung und Industrie. Vorreiter. Innovatoren. Perfektionisten.

Den Ansprechpartner für Ihre Region finden Sie unter: www.polytec.com/contact

Polytec GmbH

Polytec-Platz 1-7 · 76337 Waldbronn Tel. +49 7243 604-0 · info@polytec.de F

. .

www.polytec.com