

Schwingungsbasierte vorausschauende Erhaltungsplanung für Infrastruktur-Bauten: Software-Tools und Fallstudien

P. Martakis, Y. Reuland, Irmos Technologies AG, Zürich, CH

Abstract

Die Bewertung der Sicherheit bestehender Ingenieurbauwerke ist mit mehreren Schwierigkeiten verbunden. Viele dieser Bauten sind bereits jahrzehntelang in Gebrauch, was zu Materialverschleiss und -ermüdung führt und zusätzlich fehlen oft detaillierte Dokumentationen oder ursprüngliche Baupläne, was die Analyse des aktuellen Zustands erschwert. Auch können versteckte Mängel oder Schäden, die oftmals unter der sichtbaren Oberfläche sind, das Verhalten und die Tragsicherheit der Strukturen beeinträchtigen. Schliesslich stellen sich Herausforderungen durch den Einsatz moderner Bewertungsmethoden und Technologien, die bei älteren Konstruktionen nicht immer anwendbar oder zuverlässig sind.

Die Überwachung von Vibrationen und die Kalibrierung von Ingenieurmodellen tragen dazu bei, diese Herausforderungen zu überwinden. Durch die kontinuierliche Überwachung von Vibrationen können Ingenieure frühzeitig Anzeichen von strukturellen Problemen erkennen, bevor sie zu ernsthaften Schäden führen. Diese Daten ermöglichen es, den Zustand der Bauwerke in Echtzeit zu bewerten. Darüber hinaus kann die Kalibrierung von Modellen mit diesen Messdaten die Genauigkeit von Simulationsmodellen erheblich verbessern. Dadurch lassen sich präzisere Vorhersagen über das Verhalten und die Lebensdauer der Strukturen treffen. Dies kombiniert führt zu einer verbesserten Entscheidungsgrundlage für notwendige Instandhaltungsmassnahmen und erhöht die Sicherheit und Langlebigkeit der Bauwerke.

Die Vorzüge der Schwingungsmessung und -analyse werden anhand von zwei Fallbeispielen gezeigt.

Schwingungsbasierte vorausschauende Erhaltungsplanung für Infrastruktur-Bauten: Software-Tools und Fallstudien

Dr. Panagiotis Martakis (martakis@irmos-tech.com),
Dr. Yves Reuland (reuland@irmos-tech.com)

Irmos Technologies AG, Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich

May 2024

Die Bewertung der Sicherheit bestehender Ingenieurbauwerke ist mit mehreren Schwierigkeiten verbunden. Viele dieser Bauten sind bereits jahrzehntelang in Gebrauch, was zu Materialverschleiss und -ermüdung führt und zusätzlich fehlen oft detaillierte Dokumentationen oder ursprüngliche Baupläne, was die Analyse des aktuellen Zustands erschwert. Auch können versteckte Mängel oder Schäden, die oftmals unter der sichtbaren Oberfläche sind, das Verhalten und die Tragsicherheit der Strukturen beeinträchtigen. Schliesslich stellen sich Herausforderungen durch den Einsatz moderner Bewertungsmethoden und Technologien, die bei älteren Konstruktionen nicht immer anwendbar oder zuverlässig sind.

Die Überwachung von Vibrationen und die Kalibrierung von Ingenieurmodellen tragen dazu bei, diese Herausforderungen zu überwinden. Durch die kontinuierliche Überwachung von Vibrationen können Ingenieure frühzeitig Anzeichen von strukturellen Problemen erkennen, bevor sie zu ernsthaften Schäden führen. Diese Daten ermöglichen es, den Zustand der Bauwerke in Echtzeit zu bewerten. Darüber hinaus kann die Kalibrierung von Modellen mit diesen Messdaten die Genauigkeit von Simulationsmodellen erheblich verbessern. Dadurch lassen sich präzisere Vorhersagen über das Verhalten und die Lebensdauer der Strukturen treffen. Dies kombiniert führt zu einer verbesserten Entscheidungsgrundlage für notwendige Instandhaltungsmassnahmen und erhöht die Sicherheit und Langlebigkeit der Bauwerke.

Die Vorzüge der Schwingungsmessung und -analyse werden anhand von zwei Fallbeispielen gezeigt.

Stichwörter: Schwingungsmessungen, Datenbasierte Erhaltungsplanung, Modellkalibrierung, Permanente Tragwerksüberwachung (SHM)

1. Restnutzungsdauer einer Fahrbahndecke

Bei der visuellen Inspektion der Fahrbahndecke einer brückenähnlichen Struktur wurde eine verstärkte Rissbildung festgestellt. Der Einfluss der Risse auf das Tragwerksverhalten ist jedoch unbekannt, und je nach Annahmen reicht die Restlebensdauer (Materialermüdung der schlaffen Bewehrung) von -8 Jahren bis zu einer unendlichen Restlebensdauer. Der unbekannt Einfluss der Risse, sowie anderer Unsicherheiten, wie zum Beispiel die dynamische Amplifikation der Verkehrslasten, benötigen konservative Annahmen, welche oftmals zu unnötigen Erhaltungs- und Verstärkungsarbeiten führen.

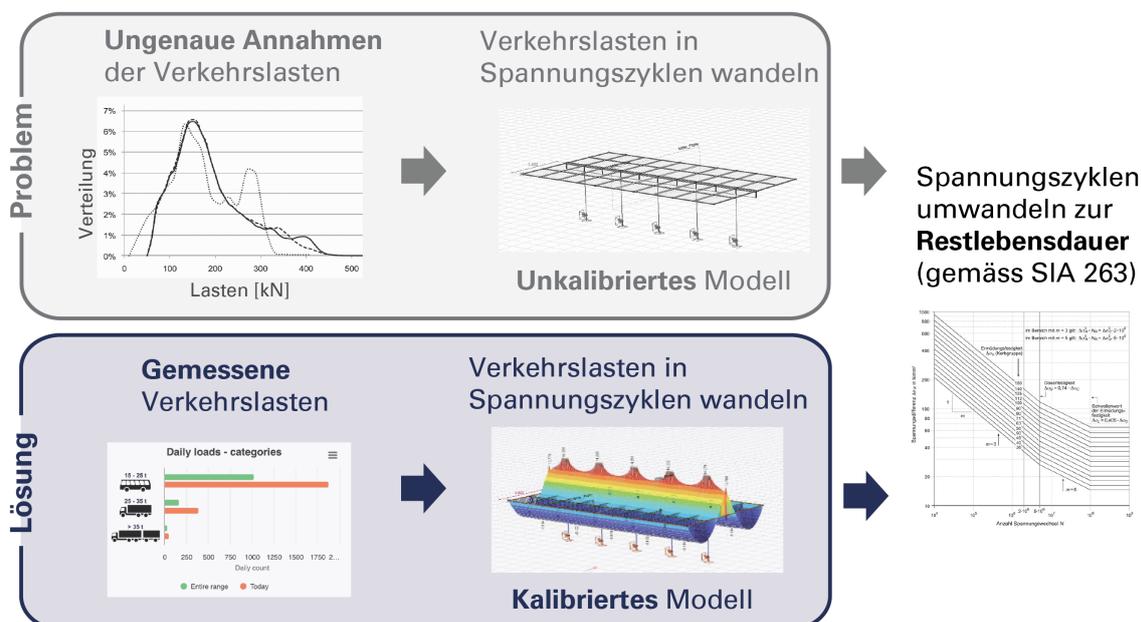


Abbildung 1: Probleme bei der derzeitigen Rückberechnung der Restlebensdauer (Materialermüdung) bestehender Tragwerke und Lösungen basierend auf Daten aus permanenten Schwingungsmessungen.

Dynamischen Messungen, im Rahmen einer permanenten Tragwerksüberwachung mit Beschleunigungsaufnehmern, stellen eine signifikante Verbesserung der Rückberechnung dar, wie in Abb. 1 gezeigt. Die Dynamische Messungen ermöglichen es, die Verkehrslasten, welche die Fahrbahndecke belasten, genau und in Echtzeit zu bestimmen. Des Weiteren werden überladene Fahrzeuge, welche die Restlebensdauer signifikant beeinflussen können, automatisch erkannt. Auch die Annahmen zur dynamische Amplifikation der Verkehrslasten können verfeinert werden. Die Umwandlung der Verkehrslasten zu Spannungen in der ausschlaggebenden Bewehrungslage kann auch verbessert werden, dank einer probabilistischen Kalibrierung des Rechenmodells. Abschliessend erlaubt eine permanente Tragwerksüberwachung es auch mögliche Schäden und Materialverschlechterungen frühzeitig zu erkennen [7].

Die einzelnen Schritte der verbesserten und datengestützten Analyse der Restnutzungsdauer sind wie folgt:

- **Analyse der dynamischen Daten** um die modalen Parameter, wie Eigenfrequenzen und Modalformen, mithilfe von Methoden der operativen Modalanalyse [4, 10] zu bestimmen.
- **Erstellen eines Surrogatmodells** um die Rechengeschwindigkeit des Ingenieurmodell um einen Faktor 1000 zu verbessern [1]. Durch eine rigorose Sensitivitätsanalyse [11] identifizieren wir die kritischen Modellparameter, die das Ergebnis der Tragwerksanalyse beeinflussen.
- **Kalibrierung der unbekannt Modellparameter des Rechenmodells** mit einem probabilistischen Ansatz, um Messdaten mit dem Ingenieurmodell zu verschmelzen [3, 2]. Dies bildet die Grundlage für eine zuverlässige und realistische Rückberechnung.
- **Ermittlung der Verkehrslasten** und des dynamischen Amplifikationsfaktors, basierend auf den Schwingungen, welche durch die Verkehrslasten erzeugt werden.
- **Bestimmung der Restlebensdauer** gemäss der Schweizer Norm (SIA) für Stahlbauten [5].

2. Erdbebenüberprüfung eines mehrstöckigen Gebäudes

Basierend auf den Modaleigenschaften, welche mithilfe von Schwingungsmessungen bestimmt werden, kann die Stockwerksteifigkeit probabilistisch abgeleitet werden und die Randbedingungen kalibriert werden. Mithilfe der Eigenperiode, welche aus den Messungen abgeleitet wird, kann der Verformungsbedarf im Erdbebenfall, gemäss den Schweizer Erdbebennormen [6], bestimmt werden. Digitale Zwillinge werden entwickelt und mit den gemessenen Daten kalibriert. Mit einem vollständig probabilistischen Ansatz übertragen wir die Unsicherheit der Eingabeparameter hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und Geometrie auf die Verschiebungskapazität der einzelnen Gebäudeelemente.

Die Erdbebensicherheit wird durch den Vergleich von Verschiebungsanforderung und Verformungskapazität anhand des Erfüllungsfaktors [6] probabilistisch bewertet. Solch eine präzise und datengesteuerte Methode erlaubt es, Kosten und CO₂-Emissionen zu optimieren, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen, wie in Abb. 2 gezeigt. Noch wichtiger ist, dass diese Optimierung wertvolle Flexibilität schafft, welche die Koordination zwischen Architekten, HLK-Planern und Bauingenieuren erheblich erleichtert.

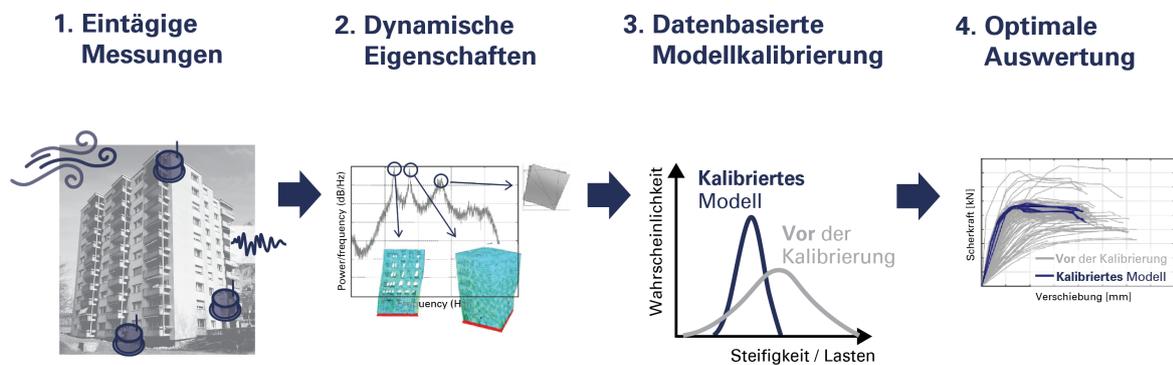


Abbildung 2: Datenbasierte Modellkalibrierung, die auf einer kurzzeitigen Messung beruht, ermöglicht es die Unsicherheiten in der Erdbebenüberprüfung signifikant zu reduzieren. Dies führt zu optimalen und zuverlässigen Ergebnissen.

3. Weitere Anwendungen

Schwingungsmessungen haben auch noch weitere Anwendungen:

- Mit Hilfe von kurzzeitigen Messungen, von einigen Stunden, im normalen Verkehrsbetrieb kann eine datenbasierte relative Einstufung mehrerer bauähnlicher Brücken in einem grösseren Portfolio erreicht werden.
- Die dauerhafte Überwachung von Gebäuden in Regionen mit Erdbebengefährdung erlaubt eine schnelle und zuverlässige datenbasierte Bewertung des Tragwerks nach einem Erdbeben [9, 8]. Dies reduziert die Dauer von Nutzungsbeschränkungen nach Erdbeben signifikant, ohne das Risiko der Gebäudenutzer zu erhöhen.

Literatur

- [1] C. Lataniotis, S. Marelli, and B. Sudret. Extending classical surrogate modeling to high dimensions through supervised dimensionality reduction: a data-driven approach. *International Journal for Uncertainty Quantification*, 10(1), 2020.

- [2] P. Martakis, Y. Reuland, and E. Chatzi. Data-driven model updating for seismic assessment of existing buildings. In *Proc. of the 10th Intern. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII 2021)*, Porto, Portugal, June 30 – July 2, 2021, pages 1401–1406, 2021.
- [3] P. Martakis, Y. Reuland, M. Imesch, and E. Chatzi. Reducing uncertainty in seismic assessment of multiple masonry buildings based on monitored demolitions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(9):4441–4482, 2022.
- [4] C. Rainieri and G. Fabbrocino. Operational modal analysis of civil engineering structures. *Springer, New York*, 142:143, 2014.
- [5] Schweizerischer Ingenieur-und Architektenverein. SIA 263: Stahlbau, SN 505263, 2013.
- [6] Schweizerischer Ingenieur-und Architektenverein. SIA 269-8: Erhaltung von Tragwerken - Erdbeben, SN 505269/8:2017, 2017.
- [7] Y. Reuland, L. Garcia-Ramonda, P. Martakis, S. Bogoevska, and E. Chatzi. A full-scale case study of vibration-based structural health monitoring of bridges: prospects and open challenges. *ce/papers*, 6(5):329–336, 2023.
- [8] Y. Reuland, A. Khodaverdian, H. Crowley, C. Nievas, P. Martakis, and E. Chatzi. Monitoring-driven post-earthquake building damage tagging. In *Intern. Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES)*, Milan, Italy, August 30-September 1, 2023, pages 550–559. Springer, 2023.
- [9] Y. Reuland, P. Martakis, and E. Chatzi. A comparative study of damage-sensitive features for rapid data-driven seismic structural health monitoring. *Applied Sciences*, 13(4):2708, 2023.
- [10] E. Reynders. System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 19:51–124, 2012.
- [11] B. Sudret. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability engineering & system safety*, 93(7):964–979, 2008.