

Zusammenfassung der Doktorarbeit

Vibration-based Monitoring of Concrete Catenary Poles using Bayesian Inference

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor – Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

M.Sc. Feras Alkam
aus Damaskus, Syrien

Mentor:

Prof. Dr. rer. nat. Tom Lahmer

– interner Doktorand –

Weimar, April 2020

Problemstellung

1. Weltweit werden Masten für Stromübertragungs- und Kommunikationsleitungen, sowie für die Installation von Straßenbeleuchtungen, Antennen und Oberleitungen elektrischer Schienenfahrzeuge eingesetzt. Diese werden derzeit überwiegend aus Holz, Stahl oder Beton hergestellt.
2. Im Vergleich zu anderen Arten von Masten sind die in dieser Arbeit im Fokus stehenden vorgespannten Schleuderbetonmasten günstiger in ihrer Herstellung. Sie weisen eine längere Lebensdauer auf und verursachen dabei noch geringere Lebensdauerkosten.
3. Die Schleuderbetonmasten, die aus vorgespanntem, ultra-hochfestem Beton bestehen, sind insbesondere bei elektrischen Schienenfahrzeugsystemen weit verbreitet. Tausende solcher Masten wurden in Deutschland entlang neuer Hochgeschwindigkeitsstrecken installiert, auf denen Züge mit bis zu 330 km/h verkehren.
4. Angesichts der Kosten für die Herstellung und den Betrieb dieser Schleuderbetonmasten sowie ihrer zentralen Bedeutung für die elektrischen Schienenfahrzeugsysteme sind weitere Anstrengungen erforderlich, um Veränderungen im Strukturverhalten während des gesamten Lebenszyklus dieser Masten zu erfassen. Hierfür wird ein Algorithmus zur Überwachung und Frühwarnung benötigt, der mithilfe eines Indikatorparameters einen möglichen Schaden am Mast prognostizieren kann.

Zielsetzung der Arbeit

5. Ein geeigneter Überwachungsalgorithmus zur Verfolgung von Änderungen im Strukturverhalten der Masten ist zu entwickeln. Der Algorithmus soll dabei die Fähigkeit besitzen, Strukturveränderungen im Mast zu erkennen, die sowohl durch langfristige Materialalterungs- und -degradationsprozesse verursacht werden als auch auf lokale Schäden entlang des Mastes zurückzuführen sind.
6. Es wird ein geeigneter stochastischer Schadenserkenntnisalgorithmus zur Lokalisierung des erwarteten Schadens sowie zur Bestimmung des Schweregrads des Schadens realisiert. Somit kann ein sich anschließender Entscheidungsprozess mit den erforderlichen Informationen versorgt werden, um den geschädigten Mast entweder zu warten oder zu ersetzen.
7. Unter Verwendung der aufgezeichneten Langzeitmessungen dreier Masten der Bahnstrecke Erfurt-Leipzig wird eine Systemidentifikation implementiert, welche den aktuellen Zustand der Masten ermittelt.
8. Basierend auf dem stochastischen Ansatz der Bayes'schen Inferenz (BI) werden durch Verknüpfung von Ergebnissen verschiedener physikalischer Experimente mit Ergebnissen von Finite-Elemente-Modellen die tatsächlichen Materialeigenschaften der Masten identifiziert.

Stand der Wissenschaft

9. Dem Verhalten von Oberleitungsmasten wird in der Literatur kaum Beachtung geschenkt, insbesondere für die in der Bahninfrastruktur eingesetzten Masten. Die Forschungen konzentrieren sich hauptsächlich auf zuginduzierte Schwingungen und deren Auswirkungen auf das Oberleitungssystem und die Umgebung, ohne dabei das Verhalten der Oberleitungsmasten selbst angemessen zu untersuchen.
10. Insbesondere die Untersuchung von zuginduzierten Bodenschwingungen und deren Interaktion mit nahen gelegenen Strukturen, die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Lärmschutzwänden sowie die Analyse der Wechselwirkung zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung sind Gegenstand der Forschung.
11. In der Ingenieurwissenschaft stellt die Parameteridentifikation (PI) in der Regel ein schlecht-gestelltes inverses Problem dar. Die Ursache hierfür liegt in den Unschärfen, die mehrheitlich durch die Abstraktionen im Modellbildungsprozess, Parameterunschärfe sowie durch Störungen in den Messsignalen induziert werden.

12. Die BI kombiniert im Sinne einer Unschärfequantifizierung (UQ) *a priori* Informationen der zu identifizierenden Parameter mit den aus den Daten erhobenen Informationen. Folglich löst die BI inverse Probleme in einer eindeutigen Weise und liefert Ergebnisse in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (*a posteriori* Verteilungen) der Parameter. Dadurch wird eine UQ durch die Berechnung statistischer Eigenschaften der Parameter ermöglicht.
Die klassische Anwendung der BI berücksichtigt jedoch nicht die Sensitivität der Modellantwort auf Änderungen eines Parameters. Dies verringert insbesondere in zeitabhängigen Systemen die Qualität der Parameteridentifikation erheblich.
13. SHM-Systeme und Schadenserkennungsansätze sind vielversprechende Forschungsgebiete im Ingenieurwesen. Eine Vielzahl von Verfahren, die den Zustand von Strukturen überwachen, ungewöhnliches Verhalten erkennen und den Schweregrad sowie die Position der strukturell geschädigten Bereiche identifizieren, wurden untersucht. Dabei kommen vor allem Techniken des maschinellen Lernens, der Signalverarbeitung oder der Modalanalyse zur Anwendung.
Die vorgeschlagenen Ansätze bieten dabei nur bauwerks- und/oder situationspezifische Lösungen und können nicht auf beliebige Strukturen bzw. Situationen angewendet werden. Die Herausforderung liegt in der Lokalisierung und Bestimmung des Schweregrades eines Schadens. Hier bedarf es weitergehender Entwicklungen.

Eingesetzte Methoden

14. Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wird die BI verwendet, um die Parameter eines Mastes zu identifizieren. Dazu werden die Messdaten mehrerer, verschiedener Labor-Experimente (im Maßstab 1:1) mit 3D-FEM Simulationen kombiniert. Der vorgeschlagene, sensitivitätsbasierte Ansatz zur Parameteridentifikation ist so implementiert, dass die Messungen auf der Grundlage der Sensitivität der Parameter in Teilmengen unterteilt werden. Dann wird der Bayes'sche Ansatz sequenziell angewendet, indem die *a posteriori* Wahrscheinlichkeit des aktuellen Schritts als *Prior* des nachfolgenden Schrittes betrachtet wird. Die unbekannt Parameter und deren zugehörigen Hyperparameter werden im Sinne von *a posteriori* Verteilungen durch ein Stichprobenverfahren, namentlich dem Transitional Markov Chain Monte Carlo (TMCMC) Algorithmus, ermittelt.
15. Über einen Zeitraum von 4 Jahre wurden die strukturellen Antworten der Masten während der Zugdurchfahrten gemessen und gespeichert. Um die Auswirkung der Durchfahrten auf die Eigenfrequenzen des Mastes zu analysieren, wird die Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. Short-Term-Fourier Transform, STFT) verwendet. Ergänzend erfolgt mit Hilfe der *output-only* Modalanalyse, der sogenannten Stochastic Subspace Identification (SSI), die gezielte Systemidentifikation der Masten, d.h. die Bestimmung der Eigenfrequenzen, Dämpfungsgrade und Eigenformen. Mittels dieser Ergebnisse wird der Zustand der Masten beschrieben.
16. In Ermangelung von Daten geschädigter Masten wird deren Verhalten mithilfe von FEM Modellen simuliert. Dabei werden die langfristige Betonschädigung sowie die Auswirkungen lokaler Risse an verschiedenen Stellen mit unterschiedlicher Schweregrade berücksichtigt. Die somit erzeugten künstlichen Messdaten werden zusätzlich mit unterschiedlichen Rausch-Pegeln gestört, um die entwickelten Verfahren zur Überwachung und Schadenserkennung anzuwenden.
17. Der Zustand eines überwachten Mastes wird durch den Vergleich neu aufgezeichneter mit früheren Daten des SHM-Systems ermittelt. Ein neu entwickelter vibrationsbasierter Statusüberwachungsalgorithmus klassifiziert den aktuellen Zustand der Masten als intakt oder geschädigt. Wird eine Schädigung erkannt, kommt ein stochastisches Schadenserkennungsverfahren zur Anwendung, um den Schaden zu lokalisieren und zu quantifizieren.
18. Das stochastische Schadenserkennungsverfahren basiert dabei auf der BI und den Eigenschaften der Masten, die sich aus der Simulation der geschädigten Masten

ergeben. Ein auf der Krümmung der Masten basierender Identifikationsalgorithmus dient zum Erstellen einer informativen *a priori* Verteilung für die Schadenssortung. Anschließend wird ein frequenzbasierter Bayes'scher Algorithmus unter Verwendung des Konzepts der Datenfusion mehrerer Eigenfrequenzen angewendet, um den Ort und die Schwere des Schadens in einem stochastischen Kontext zu identifizieren.

Wesentliche Ergebnisse

19. Die vorgeschlagene Vorgehensweise zeichnet sich durch ihre einfache und schnelle Anwendbarkeit aus. Sie basiert auf den Eigenfrequenzen der Masten, die, im Vergleich zu anderen verfügbaren Ansätzen in der Literatur, mit einer geringeren Anzahl von Beschleunigungssensoren bestimmt werden können. Des Weiteren nutzt der Ansatz den Vorteil der Datenfusion beim Zusammenführen von Daten verschiedener Quellen und Methoden, um die Qualität und Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.
20. Der frequenzbasierte Bayes'sche Identifikationsalgorithmus verwendet die aus der Simulation des geschädigten Mastes erzeugten Messdaten. Dieser Algorithmus ist in der Lage, die Position und den Grad der Schädigung effizient als Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu identifizieren. Der Algorithmus identifiziert dabei die Position der Schädigung mit einer maximalen Abweichung von 12 % der Mastlänge bei einem Rauschpegel von 5 %, was bedeutet, dass der Schaden innerhalb eines maximalen Fehlers von 1,15 m lokalisiert wird. Die Schadensschwere wird mit einer maximalen Abweichung von 12 % von der realen Schadensschwere bestimmt.
21. Der vorgeschlagene krümmungsbasierte Identifikationsalgorithmus bietet eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Identifikation der Regionen rund um die Schadensstelle, was ihn zu einem geeigneten *a Prior* für die exakte Lokalisierung des Schadens durch den frequenzbasierten Bayes'sche Identifikationsalgorithmus macht. Dieser Algorithmus erzeugt informative *a priori* Verteilungen mithilfe von Sensorabständen von 2000 mm bis 2500 mm, sogar bei einem hohen Rauschpegel.
22. Die Qualität der abgeleiteten Parameter wird durch die Entwicklung eines angepassten sequenziellen Bayes'schen Ansatzes im Vergleich zu den Ergebnissen klassischer Bayes'scher Ansätze, die alle verfügbaren Daten unmittelbar auswerten, deutlich verbessert.
23. Durch Berücksichtigung als Hyperparameter kann der Gesamtfehler des gesamten PI-Prozesses bestimmt werden. Die Ergebnisse des PI-Prozesses bestätigen die Korrelationen zwischen der Unschärfe und der Sensitivität der Parameter. Darüber hinaus macht die erhebliche Abweichung zwischen den identifizierten und den nominalen Parametern auf die Bedeutung des PI-Prozesses aufmerksam. Dies ist eine wesentliche Erkenntnis in Bezug auf die Bewertung des Verhaltens bestehender Strukturen.
24. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des stochastischen und eines klassischen deterministischen Ansatzes zeigt, wie wichtig es ist, die BI, trotz erhöhtem Rechenaufwands, anzuwenden, um die Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu bestimmen und die Unschärfe der identifizierten Parameter sowie deren paarweise Korrelation zu quantifizieren.
25. Sowohl die STFT als auch die SSI Methode identifizieren die Masten als unbeschädigt. Die festgestellten Änderungen der Eigenfrequenzen sind auf jahreszeitliche und regelmäßige kurzzeitige Einwirkungen zurückzuführen. Folglich bilden die gewonnenen Ergebnisse dieser Analysen das unbeschädigte Verhalten des Mastes über den betrachteten Zeitraum ab. Die Verwendung der STFT zeigt darüber hinaus, dass die Signale außerhalb der Zugdurchfahrten für die Bewertung der Eigenfrequenzen des Mastes angemessener sind.