

Modalanalyse von Monitoringdaten eines Sendeturms

Im Rahmen des DFG Graduiertenkollegs 1462 wurde an einem ca. 200 m hohen Sendeturm mit rotationssymmetrischem Querschnitt ein Monitoringsystem zur Erfassung von Schwingbeschleunigungen, Temperaturen und Windeinwirkungen installiert, welches über einen Zeitraum von zwei Jahren betrieben wurde. Die Auswertung der Schwingungsdaten erfolgte mithilfe einer automatisierten Output-only-Modalanalyse. In der vorliegenden Studie wurde die Stochastic-Subspace-Identification-Methode in Verbindung mit einem automatischen, dreistufigen Clustering-Algorithmus zur Identifikation der modalen Parameter und deren Varianzen verwendet.

Es wurden Abhängigkeiten der modalen Parameter von den Umgebungsbedingungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aller Datenpunkte ermittelt. Bei ideal rotationssymmetrischen Bauwerksquerschnitten treten alle Eigenschwingungen paarweise mit orthogonal zueinander stehenden Eigenformen auf. In realen Systemen ergeben sich aus diesen doppelten Eigenformen paarweise kombinierte Eigenformen mit eng beieinanderliegenden Eigenfrequenzen. Die Hauptschwingungsrichtungen dieser Eigenformen wurden ermittelt und in Beziehung zur Windrichtung betrachtet.

Keywords Modalanalyse; Monitoring; OMA; Schwingung; Rotationssymmetrie; Sendeturm; Unsicherheit

Operational Modal Analysis of monitoring data of a telecommunication tower

In the framework of the DFG research training group, a monitoring system was installed on a telecommunication tower with a height of approximately 200 m and a rotationally symmetric cross section. Its main purpose was the acquisition of vibratory accelerations, temperatures and wind actions and it was operated for two years. The analysis of the vibration data was done by means of an automated Operational Modal Analysis. In the presented study, the Stochastic Subspace Identification method in conjunction with a three-stage clustering algorithm was used to automatically estimate the modal parameters and their variances.

Several relations of the modal parameters with the environmental conditions were identified and rendered more precisely by considering the uncertainties of all data points. In structures with an ideal rotationally symmetric cross-section, all vibrational modes appear in pairs with orthogonally oriented mode shapes. In real-world systems pairwise combined mode shapes with closely-spaced natural frequencies result from the associated modes. The main directions of vibration of these mode shapes were identified and related to the wind directions.

Keywords Operational Modal Analysis; monitoring; OMA; vibration; rotational symmetry; uncertainties

1 Einleitung

Für eine Vielzahl von bestehenden Bauwerken, insbesondere Infrastrukturbauwerken, stellt sich bei Erreichen der geplanten Lebensdauer die Frage der weiterführenden Nutzung. In Fällen, in denen nicht alle Nachweise nach den heute geltenden Normen auf Grundlage von Bestandsunterlagen geführt werden können, besteht die Möglichkeit, das Tragverhalten messtechnisch zu überwachen. Bei vorwiegend durch dynamische Kräfte beanspruchten Bauwerken kommt der Erfassung des dynamischen Strukturverhaltens, beschrieben durch die modalen Parameter, eine besondere Rolle zu.

Auftretende Veränderungen der identifizierten modalen Parameter können auf Strukturveränderungen infolge von Schädigungen oder Alterungen hinweisen. Sie wer-

den aber auch durch wechselnde Umweltbedingungen verursacht. Um diese Einflüsse von denen einer substantiellen Strukturveränderung unterscheiden zu können, ist eine geeignete messtechnische Erfassung der dominierenden Einwirkungen notwendig. Im vorliegenden Beitrag werden ein messtechnisches Konzept sowie eine Strategie zur Datenauswertung im Rahmen der Bauwerksüberwachung eines Sendeturms vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen die Eignung der gewählten Vorgehensweise zur Identifikation auch relativ kleiner Veränderungen des dynamischen Strukturverhaltens.

2 Monitoringsystem

Das hier betrachtete Bauwerk ist ein ungefähr 200 m hoher Sendeturm, der in den 1970er-Jahren errichtet wurde. Die für die damalige Zeit typische Konstruktion besteht aus einem frei stehenden rotationssymmetrischen, sich nach oben verjüngenden Spannbetonturm mit einem aufgesetzten Stahlschaft. Den oberen Abschluss bildet ein Zylinder aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

*) Corresponding author: simon.jakob.marwitz@uni-weimar.de
Submitted for review: 14 August 2017
Revised: 13 November 2017
Accepted for publication: 22 December 2017

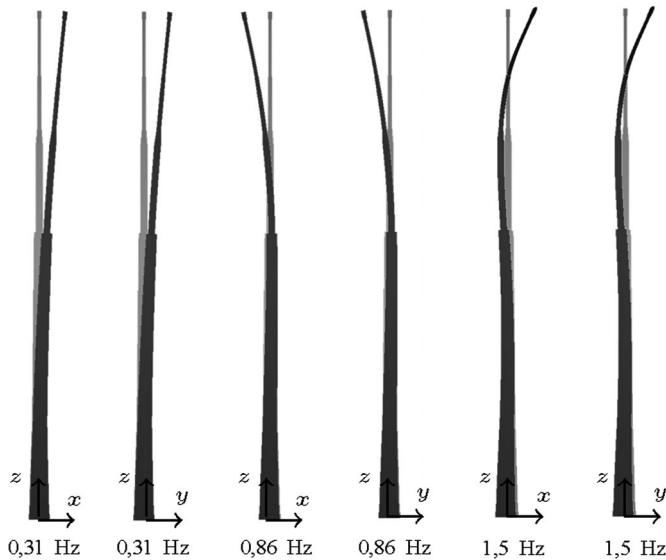


Bild 1 Numerische Eigenformen und Eigenfrequenzen des Sendeturms
Numerical mode shapes and natural frequencies of the telecommunication tower

Mithilfe eines Langzeitmonitoringsystems sollte das dynamische Verhalten des Turms in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen untersucht werden. Aus einer numerischen Modalanalyse mit einem Finite-Elemente-Modell ergaben sich die ersten Biegeeigenschwingungen bei 0,31 Hz, 0,86 Hz und 1,5 Hz (Bild 1). Aufgrund der Rotationssymmetrie treten diese doppelt auf, wobei die zugehörigen Eigenformen orthogonal zueinander stehen.

Ausgehend von diesen Voruntersuchungen wurde die in Bild 2 skizzierte Sensoranordnung für ein Langzeitmonitoring entwickelt. Die Instrumentierung erfolgte dabei in zwei Phasen. Zunächst wurden sowohl am Fuß des Stahlschafts als auch an der Turmspitze und auf dem Schwingungsdämpfer jeweils zwei orthogonal zueinander ausgerichtete Beschleunigungssensoren installiert. Zur Erfassung der Umwelteinflüsse sind sowohl an der Turmspitze als auch auf halber Turmhöhe Temperatursensoren sowie Anemometer zur Erfassung von Windgeschwindigkeit und -richtung montiert worden. In einer zweiten Phase folgte die Installation weiterer Beschleunigungsaufnehmer auf drei Ebenen im Bereich des Stahlschafts.

Die Beschleunigungswerte und Winddaten (Geschwindigkeit und Richtung) werden kontinuierlich mit 100 Hz Abtastrate aufgezeichnet. Die Temperaturdaten werden minütlich registriert. Alle Daten werden auf einen zentralen Server übertragen und dort vollautomatisch ausgewertet.

3 Datenauswertung

Zur Auswertung der Messdaten werden diese vorverarbeitet und die Schwingungsdaten durch eine Output-only-Modalanalyse ausgewertet. In der Nachverarbeitung werden aus der Modalanalyse automatisiert die gewünschten modalen Parameter identifiziert und in Relati-

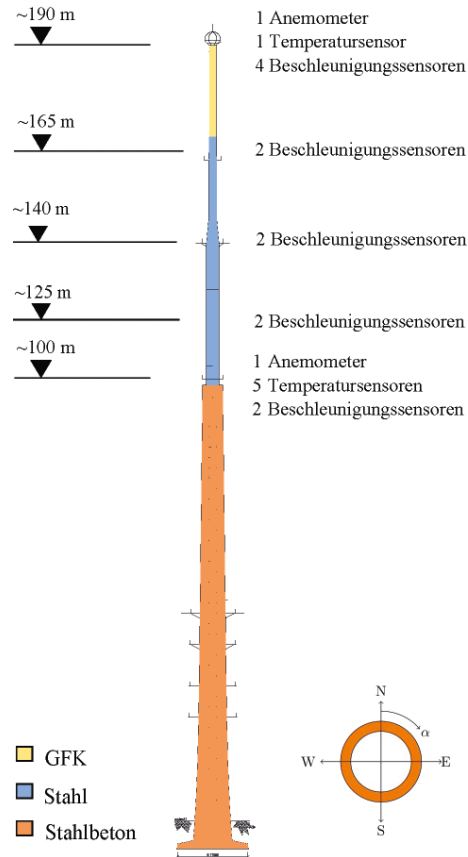


Bild 2 Instrumentierung des Sendeturms
Instrumentation of the telecommunication tower

on zu den anderen Messgrößen gesetzt. Um später auch Aussagen mit Bezug auf Schwingungsintensitäten treffen zu können, werden für alle Zeitreihen jeweils die Effektivwerte über den Zeitraum 1 h berechnet.

3.1 Datenvorbereitung

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags lagen etwa 15 000 h Schwingungsmessdaten vor. Zur Reduzierung des Informationsgehalts auf den relevanten Frequenzbereich wurden die Zeitreihen zunächst um den Faktor 8 reduziert (resultierende Abtastrate 12,5 Hz). Ein erster Eindruck von der Anzahl der identifizierbaren Eigenschwingungen lässt sich aus den Singulärwerten der Spektralmatrizen gewinnen. In Bild 3 sind beispielhaft die ersten acht Singulärwerte der für eine Messung ermittelten Spektralmatrizen über der Frequenz aufgetragen. Aus den Kurven lassen sich sehr gut Spitzen mit sehr eng beieinanderliegenden Frequenzen erkennen. Diese Spitzen korrespondieren jeweils mit zwei Eigenschwingungen, deren Hauptschwingrichtungen orthogonal zueinander verlaufen.

Um Relationen zwischen identifizierten modalen Parametern, die jeweils aus 60 min langen Zeitreihen ermittelt wurden, und Umweltbedingungen aufzeigen zu können, sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Temperaturen, Windgeschwindigkeiten und

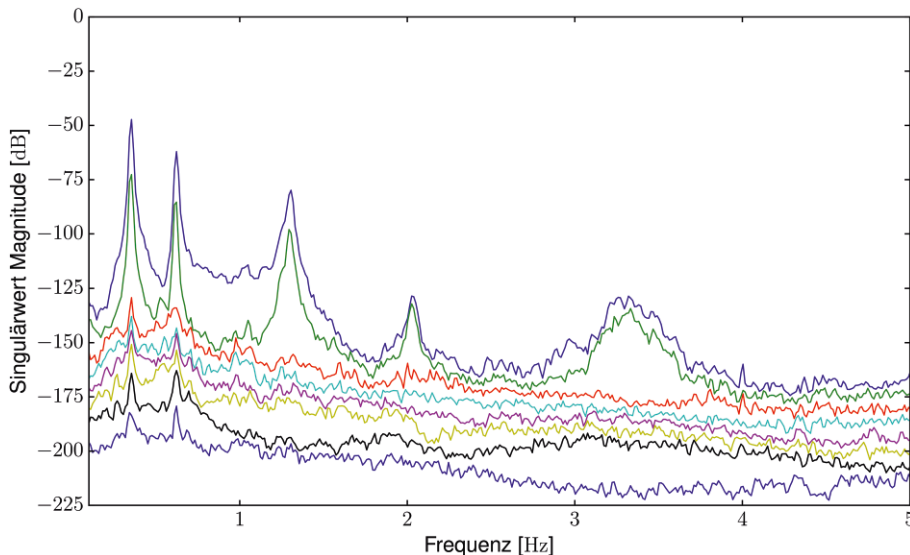


Bild 3 Singulärwertspektrum der Schwingungsdaten des Sendeturms
Spectrum of singular values of the vibrational data of the telecommunication tower

-richtungen über den jeweiligen Beobachtungszeitraum berechnet worden. Die Winddaten liegen in Polarkoordinaten vor (Windrichtung und -geschwindigkeit). Die statistischen Größen wurden daher über einen Orthogonal-least-squares-Ansatz in kartesischen Koordinaten ermittelt. Die berechneten Standardabweichungen dienen in den Diagrammen, die in den Bildern 5–10 dargestellt sind, jeweils als Wichtungsgröße. Dabei sind Datenpunkte mit hohen Standardabweichungen weniger stark gewichtet als solche mit niedrigen Standardabweichungen. Für die Auswertungen mit Temperaturbezug wurden immer die auf der Nordseite des Turms gemessenen Temperaturen verwendet.

3.2 Modalanalyse

Die Identifikation der modalen Parameter, also der Eigenfrequenzen, Dämpfungswerte und Schwingungsformen aus den gemessenen Beschleunigungszeitreihen, erfolgt mithilfe einer Operational Modal Analysis (OMA). (Die deutsche Entsprechung wäre Betriebsschwinganalyse. Da sich ein solcher Begriff noch nicht etabliert hat, wird hier die englische Bezeichnung verwendet.) Die Verfahren der OMA lassen sich in Frequenzbereichs- und Zeitbereichsmethoden unterteilen, wobei sich Erstere durch ihre intuitive Anwendbarkeit auszeichnen und Letztere – insbesondere im Fall eng beieinanderliegender Eigenfrequenzen, der Bestimmung zuverlässiger Dämpfungswerte und bei Vorliegen nicht stationärer Anregung – ihre Vorteile haben. Ein Überblick über die OMA findet sich in [1, 2].

Man unterscheidet weiterhin in parametrische und nicht parametrische Methoden. Bei Ersteren erfolgt zunächst die Identifikation eines parametrischen Modells, welches die Messdaten in guter Näherung approximieren kann. Aus diesem Modell werden anschließend die modalen Parameter gewonnen.

Die Auswertung der am Sendeturm aufgezeichneten Beschleunigungsdaten erfolgte mit der referenzbasierten, datengesteuerten Stochastic Subspace Identification (SSI) [3], die auf einem in der Regelungstechnik üblicherweise verwendeten Zustandsraummodell basiert. Die Messdaten werden in zwei Block-Hankel-Matrizen angeordnet. Durch Projektion der Zeilenräume dieser future und past genannten Matrizen und Faktorisierung des Resultats kann ein zugrunde liegendes lineares System identifiziert werden.

Die Ermittlung der Varianzen bzw. Standardabweichungen erfolgt durch Anwendung der Störungstheorie. Dazu werden die Messdaten zunächst in mehrere Blöcke unterteilt und daraus die Varianzen der Eingangsdaten errechnet. Diese werden, mithilfe analytisch ermittelter Störungen erster Ordnung für die einzelnen Schritte des Stochastic-Subspace-Identification-(SSI-)Algorithmus, auf die modalen Parameter übertragen [4, 5]. Analog zu dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Verfahren wurden diese Standardabweichungen in den Diagrammen, die in den Bildern 5–10 dargestellt sind, jeweils als Wichtungsgröße verwendet. Dabei wurden Datenpunkte mit hohen Standardabweichungen weniger stark gewichtet als solche mit niedrigen Standardabweichungen.

3.3 Nachbereitung der Datenanalyse

Wie bereits erwähnt, wird im ersten Analyseschritt der parametrischen OMA-Methoden ein mathematisches Modell identifiziert. Allerdings ist a priori die Ordnung dieses Modells nicht bekannt. Daher berechnet man zunächst Modelllösungen für sehr viele Modellordnungen. Ein großer Teil dieser Lösungen hat allerdings keinen physikalischen Bezug zum untersuchten System. Klassischerweise bedient man sich für die Selektion der Lösungen mit physikalischem Bezug Stabilisierungsdiagrammen, aus denen die Auswahl manuell erfolgt.

Die Auswertung der bei einer kontinuierlichen Bauwerksüberwachung aufgezeichneten großen Datenmengen erfordert allerdings eine Automatisierung dieser Auswahl. Mehrere Autoren haben in der Literatur verschiedene Verfahren dafür vorgeschlagen. Hier wurde ein dreistufiger Cluster-Algorithmus verwendet [6].

Bei diesem wird zunächst versucht, die Lösungen mit physikalischem Bezug von denen, die rein rechnerisch entstehen, durch ein k-means-Clustering zu separieren. Dazu werden alle verfügbaren modalen Vergleichsmaße (Frequenz, Dämpfung, Varianzen derselben, Komplexität der Modi etc.) verwendet. In der zweiten Stufe werden die in der ersten Stufe als Lösungen mit physikalischem Bezug identifizierten Datensätze durch ein hierarchisches Clustering gruppiert, wobei Gruppen mit sehr wenigen Datenpunkten entstehen können. In einem dritten Schritt werden wieder durch ein k-means-Clustering Gruppen mit sehr wenigen Elementen eliminiert. Mithilfe dieses Algorithmus wurden aus allen 15000 Datensätzen die Eigenfrequenzen, modalen Dämpfungsmaße und Eigenformen sowie die jeweiligen Standardabweichungen ermittelt.

Die SSI-Algorithmen sind i. Allg. in der Lage, eng liegende Eigenschwingungen zu separieren. In einigen Fällen gelingt dies jedoch nur mit Einschränkungen. So ist zu beobachten, dass die identifizierten Eigenformen mit eng beieinanderliegenden Eigenfrequenzen häufig als komplexe Kombination der beiden Eigenformen abgebildet werden, wobei eine davon jeweils dominiert.

Dieses Phänomen lässt sich grafisch darstellen (Bild 4), indem man die modalen Verschiebungen eines Messpunkts, also die Komponenten der Eigenform in zwei Messrichtungen an diesem Punkt, für eine Periode in der Bewegungsebene aufträgt. Dabei erhält man eine Ellipse mit den Amplituden a_x , a_y und den zugehörigen Phasenwinkeln φ_x , φ_y jeweils in x- und y-Richtung.

Die Haupttrichtung dieser Ellipse lässt sich aus der Formulierung der Länge des Ortsvektors

$$r(t) = \sqrt{r_y(t)^2 + r_x(t)^2} \quad \text{mit} \quad r_y(t) = a_y \cos(\varphi_y + t), \quad (1)$$

$$r_x(t) = a_x \cos(\varphi_x + t)$$

und Nullsetzen der ersten Ableitung nach der Zeit ermitteln. Aus $\dot{r}(t) = 0$ folgen der Zeitpunkt des Auftretens der max. Länge des Ortsvektors:

$$t_{\max} = -\frac{1}{2} \arctan \frac{a_x^2 \sin(2\varphi_x) + a_y^2 \sin(2\varphi_y)}{a_x^2 \cos(2\varphi_x) + a_y^2 \cos(2\varphi_y)} \quad (2)$$

und der Winkel der Hauptachse der Ellipse:

$$\beta_{\max} = \arctan \frac{r_y(t_{\max})}{r_x(t_{\max})} = \arctan \frac{a_y \cos(\varphi_y + t_{\max})}{a_x \cos(\varphi_x + t_{\max})}. \quad (3)$$

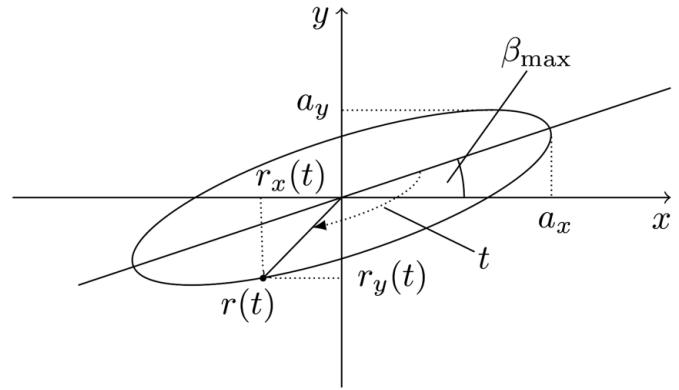


Bild 4 Ermittlung der Haupttrichtung der Eigenformen
Determination of the main direction of the mode shapes

Je nachdem, wie gut die beiden eng beieinanderliegenden Eigenschwingungen durch den Algorithmus voneinander separiert werden, variiert die Form der Ellipse. Als Indikator für den Grad der Separierung kann man demzufolge das Verhältnis der Radien von Haupt- und Nebenrichtung, das man durch Einsetzen von $t_{\max}$ bzw. $t_{\max} + \pi$ in $r(t)$ erhält, wählen. Dieses Verhältnis wird in den Bildern 5–10 als Wichtungsgröße im Sinne eines Maßes der Identifikationsqualität verwendet. Je kräftiger der jeweilige Farbpunkt ist, desto kürzer ist der kleinere Ellipsenhalmesser. Auch die Darstellungen der Histogramme und Boxplots wurden unter Zuhilfenahme gewichteter statistischer Größen erstellt.

Diese Vorgehensweise analysiert ausschließlich die identifizierten Eigenformen, die im Idealfall als orthogonale Paare auftreten. Die tatsächlichen Bewegungen des Turms sind immer eine Kombination mehrerer Eigenformen und nicht Gegenstand dieser Analysen.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt sind die wichtigsten Ergebnisse der Analysen und daraus abgeleitete Zusammenhänge dargestellt. Die ermittelten Eigenfrequenzen im zeitlichen Verlauf sind in Bild 5 gezeigt. Im Diagramm ersichtliche Lücken in einigen Ergebnisreihen sind auf veränderte Sensorkonfigurationen im Zusammenhang mit den in Abschn. 2 beschriebenen Erweiterungen bzw. technischen Störungen des Monitoringsystems zu erklären.

Die Abhängigkeit der ersten zwei Eigenfrequenzen von der Temperatur ist in Bild 6 dargestellt. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für die anderen Eigenschwingungen. Es zeigt sich eine annähernd lineare Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von der Temperatur bei geringer Streubreite der einzelnen Datenpunkte um die gedachte lineare Funktion. Als Grund dafür wird eine Zunahme der Bauteilsteifigkeit mit abnehmender Temperatur vermutet, wie z. B. in [7] dargestellt. Eine Identifikation von für die statische Auslegung wichtigen Masseänderungen durch Vereisungseffekte bei Frost bedarf weiterer Untersuchungen.

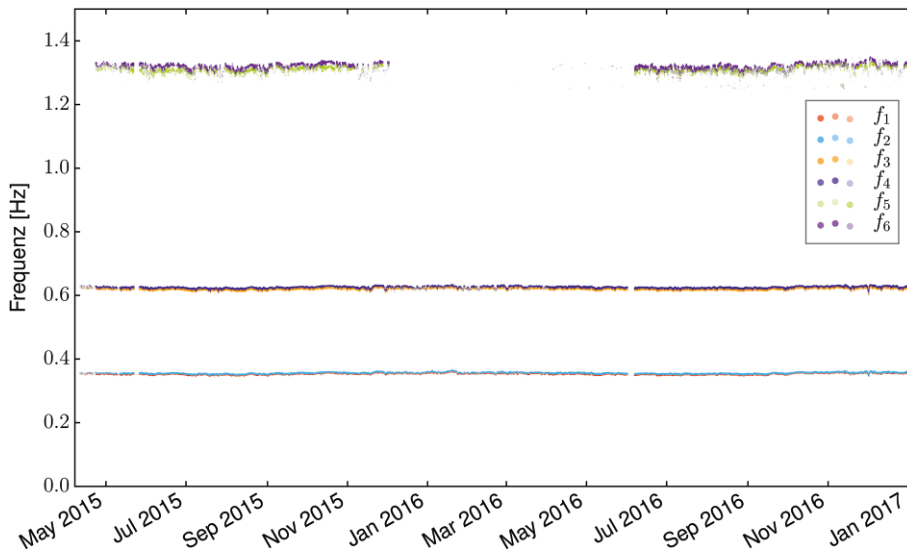


Bild 5 Zeitlicher Verlauf der ermittelten Eigenfrequenzen des Sendeturms
Identified natural frequencies of the telecommunication tower over time

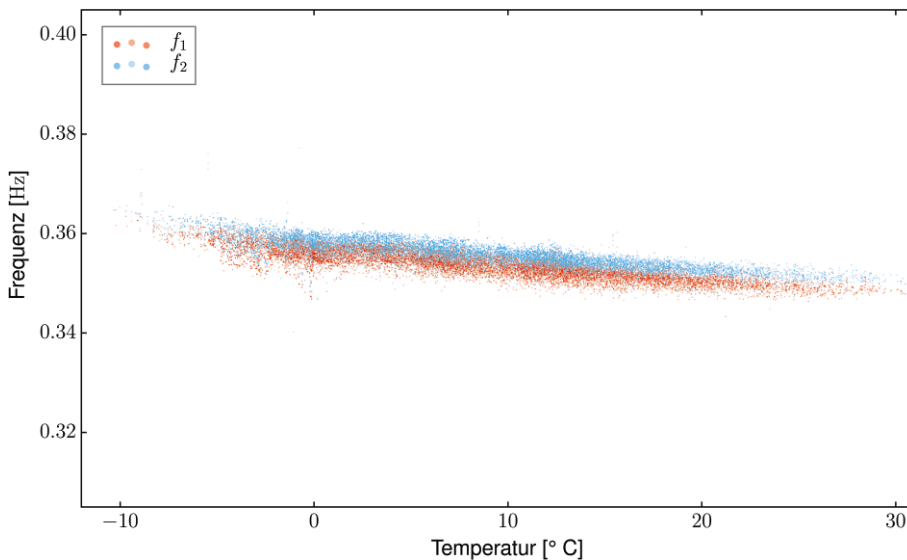


Bild 6 Zusammenhang zwischen den ersten zwei Eigenfrequenzen und der Temperatur
Relation between the first two natural frequencies and temperature

gen, da die bislang in Frostperioden aufgezeichneten Daten begrenzt sind.

Auch die identifizierten Dämpfungswerte zeigen Korrelationen mit den Umgebungsbedingungen. Bei allgemein niedriger Dämpfung von größtenteils unter 1% zeigt sich eine hohe Abhängigkeit der Dämpfungswerte vom allgemeinen Schwingungsniveau (quadratisches Mittel: RMS, Bild 7). Ein ähnliches, aber weniger deutliches Verhalten zeigt sich bei einer Gegenüberstellung von Windgeschwindigkeit und Dämpfung. Eine Zuordnung der Dämpfung zu Eigendämpfung, aerodynamischer Dämpfung und Bedämpfung durch den Schwingungsdämpfer ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Die identifizierten Eigenformen sind in Bild 8 dargestellt. Mithilfe der in Abschn. 3 beschriebenen Vorgehensweise zur Bestimmung der Orientierung der Eigenschwingrich-

tungen lassen sich die in Bild 9 dargestellten Zusammenhänge zwischen Wind- und modalen Schwingungsrichtungen ablesen. Aus den seitlich aufgetragenen Histogrammen lässt sich, insbesondere für die ersten beiden Eigenschwingungspaare, klar eine Hauptschwingrichtung erkennen. Beispielhaft wurde hier der Messpunkt am Übergangsbereich Stahlbeton–Stahl ausgewählt, jedoch zeigen sich ähnliche Verhältnisse auch für die anderen Messpunkte. Bild 10 zeigt die Verteilungen über die Bauwerkshöhe in Form eines Boxplots für alle Messpunkte für die erste gepaarte Eigenschwingung. (Boxplots dienen der Darstellung von statistischen Verteilungen mehrerer Datensätze. Für jeden Datensatz sind die Quartilsgrenzen (blaue Box), der Median (rote Linie), die Spannweite der Daten (Whisker) bis zu den Datenpunkten, welche im 1,5-fachen Interquartilsabstand liegen, sowie alle außerhalb liegenden Punkte dargestellt.) Neben zufälligen Abweichungen von der Hauptwindrichtung sind auch gerin-

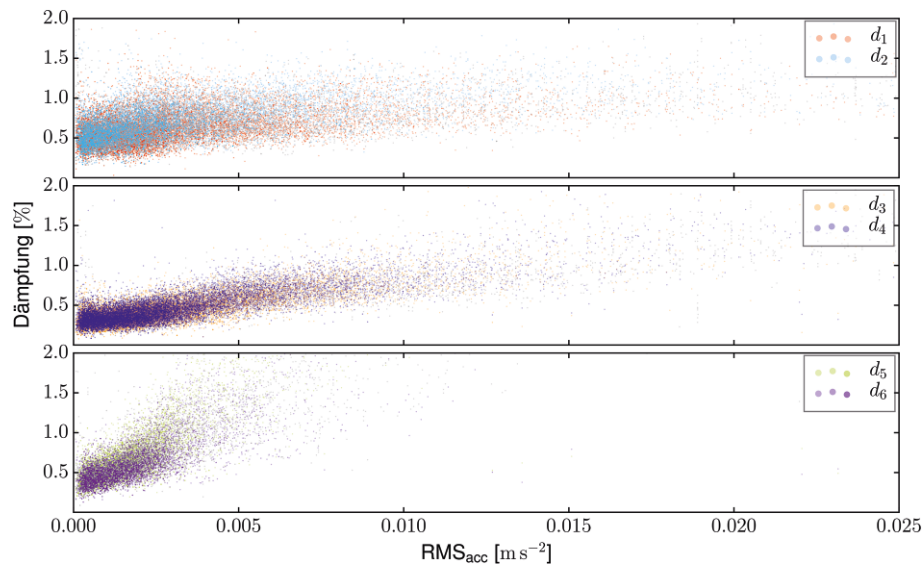


Bild 7 Modale Dämpfungswerte in Abhängigkeit vom Schwingungsniveau
Modal damping over vibration level

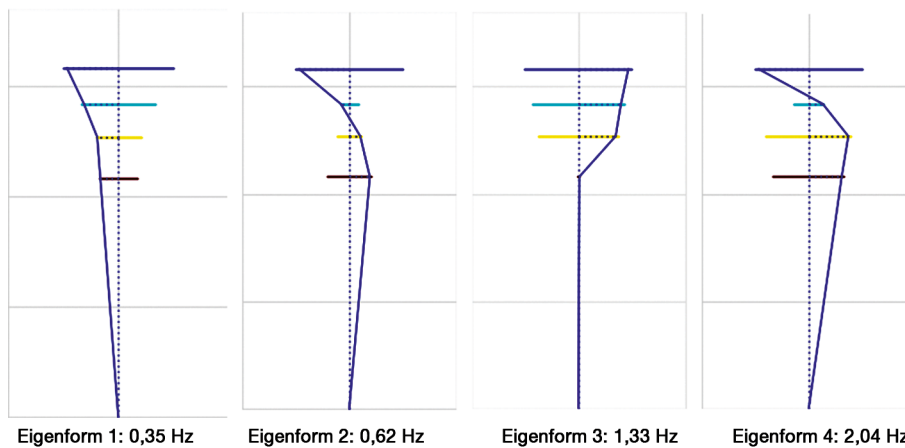


Bild 8 Experimentell ermittelte Eigenformen des Turms (Sichtebene jeweils in Hauptschwingrichtung)
Experimentally identified mode shapes of the tower (plane of sight in the respective main direction of vibration)

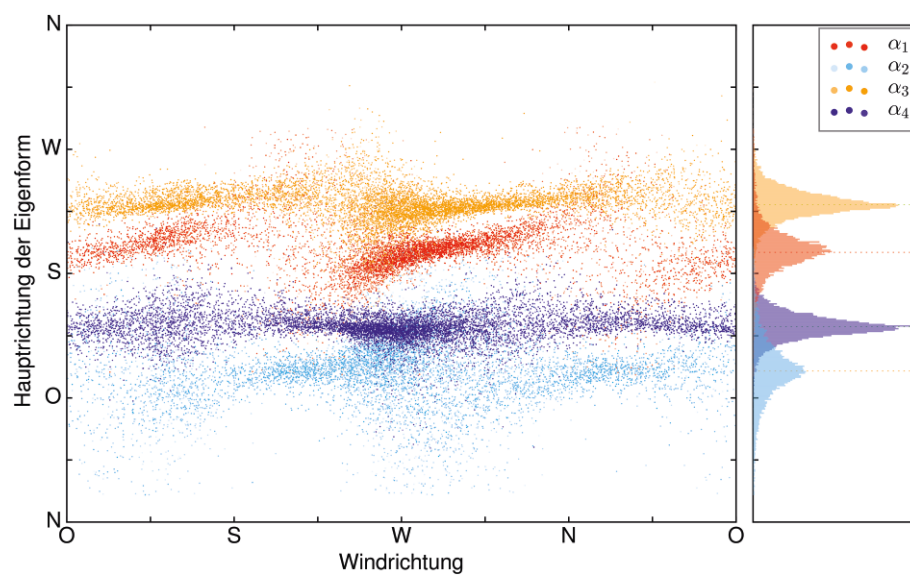


Bild 9 Hauptschwingrichtung der ersten vier Eigenschwingungen in Abhängigkeit von der mittleren Windrichtung
Main direction of the first four mode shapes depending on the mean wind direction

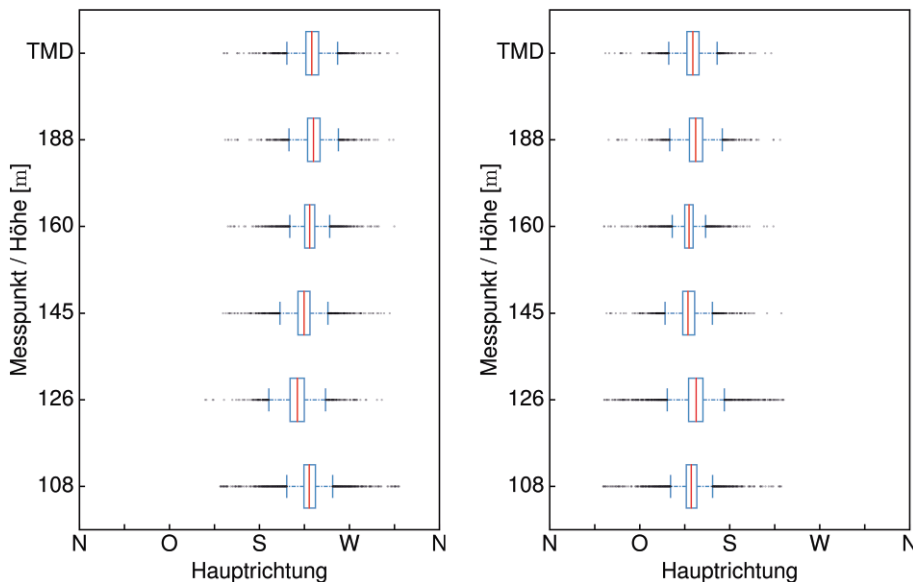


Bild 10 Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der Hauptschwingrichtungen der zweiten Doppelfrequenz (links ~ 0,62 Hz, rechts ~ 0,63 Hz) für alle Messpunkte
Statistical distributions of the main direction of vibration for the second paired mode (left ~ 0,62 Hz, right ~ 0,63 Hz) for all measurement points

ge systematische Abweichungen der Medianwerte von $\pm 3^\circ$ zu erkennen, die aus Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Sensoren herrühren könnten. Der Turm weist über die ganze Höhe konstante Hauptschwingrichtungen auf, welche nur in geringem Maße durch wechselnde Windrichtungen beeinflusst werden. Das heißt, dass bereits geringe Imperfektionen der Rotationssymmetrie ausreichen, um jeweils zwei Hauptschwingrichtungen festzulegen.

5 Fazit und Ausblick

An einem rotationssymmetrischen Turmtragwerk wurde ein Langzeitmonitoringsystem betrieben. Die automatische Auswertung der Schwingungsmessungen erfolgte mittels der Stochastic-Subspace-Identification-Methode zur Modalanalyse. Es wurden Eigenfrequenzen, modale Dämpfungswerte und Schwingungsformen sowie deren Standardabweichungen als Qualitätsmaß ermittelt. Aus den Schwingungsformen konnten die Hauptschwingrichtungen des Turms bestimmt werden.

Die ermittelten Eigenfrequenzen weisen eine geringe, annähernd lineare Abhängigkeit von der Temperatur auf. Dieses Verhalten wird auf temperaturabhängige Steifigkeitsveränderungen zurückgeführt. Ein Einfluss einer Vereisung auf das Eigenschwingverhalten infolge entsprechender Massenveränderungen konnte bisher nicht mit hinreichender Zuverlässigkeit festgestellt werden.

Literatur

- [1] RAINIERI, C.; FABBROCINO, G. (2014) *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures – An Introduction and Guide for Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [2] BRINCKER, R.; VENTURA, C. (2015) *Introduction to Operational Modal Analysis*. Weinheim: Wiley.

Die ermittelten niedrigen Dämpfungswerte liegen im typischen Bereich für schlanke Turmbauwerke, eine Zuordnung der Dämpfungsanteile zu struktureller Dämpfung, Luftdämpfung und Dämpfung des Schwingungstilgers ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Aus der statistischen Auswertung der Schwingungsformen konnte experimentell die räumlich orthogonale Ausrichtung von paarweise auftretenden Eigenformen bei rotationssymmetrischen Tragwerken experimentell nachvollzogen werden. Die verwendeten Algorithmen zur Output-only-Modalanalyse erzielten jedoch nicht immer eine vollständige Separierung der Eigenformen mit eng beieinanderliegenden Frequenzen. Bereits geringe Imperfektionen, wie Einbauten oder Antennen, führen zu einer Auflösung der Rotationssymmetrie, was durch die annähernd beständigen Hauptschwingrichtungen sowie konstanten Frequenzdifferenzen der zusammengehörigen Eigenschwingungspaare gezeigt wurde.

Dank

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des Graduiertenkollegs 1462 gefördert. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung.

- [3] VAN OVERSCHEE, P.; DE MOOR, B. (1996) *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications*. Alphen aan den Rijn: Kluwer Academic Publishers.
- [4] REYNDERS, E.; PINTELON, R.; DE ROECK, G. (2008) *Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification* in: Mechanical Systems and Signal Processing 22, H. 4, S. 948–969.
- [5] DÖHLER, M.; MEVEL, L. (2013) *Efficient multi-order uncertainty computation for stochastic subspace identification* in: Mechanical Systems and Signal Processing 38, H. 2, S. 346–366.
- [6] REYNDERS, E.; HOUBRECHTS, J.; DE ROECK, G. (2012) *Fully automated (operational) modal analysis* in: Mechanical Systems and Signal Processing 29, pp. 228–250.
- [7] PEETERS, B.; ROECK, G. D. (2001) *One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events* in: Earthquake Engng Struct Dyn 30, H. 2, S. 149–171.

Autoren

Simon Marwitz, M.Sc.
 Bauhaus-Universität Weimar
 Institut für Strukturmechanik
 Marienstraße 15
 99423 Weimar
 simon.jakob.marwitz@uni-weimar.de

Dr.-Ing. Volkmar Zabel
 Bauhaus-Universität Weimar
 Institut für Strukturmechanik
 Marienstraße 15
 99423 Weimar
 volkmar.zabel@uni-weimar.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke
 Bauhaus-Universität Weimar
 Institut für Strukturmechanik
 Marienstraße 15
 99423 Weimar
 carsten.koenke@uni-weimar.de