

# Hybriddürme von Windenergieanlagen: Einfluss der Fugenimperfektionen auf Biegemoden

Clemens Jonscher, Marlene Wolniak, Benedikt Hofmeister, Tanja Griebmann und Raimund Rolfes

*Institut für Statik und Dynamik, Leibniz Universität Hannover*

**Zusammenfassung:** Für große Tragstrukturen von Onshore-Windenergieanlagen werden häufig Stahl-Beton-Hybriddürme verwendet. Diese bestehen im unteren Bereich aus Spannbetonsegmenten mit trockenen Fugen und im oberen Bereich aus Stahlrohren. Mit einem großmaßstäblichen Laborversuch wird der Einfluss der Fugenimperfektion auf die Eigendynamik durch Aufbringen verschiedener Vorspannungen untersucht. Fokus der Untersuchung ist das erste dichtbenachbarte Biegemodenpaar.

## 1 Einleitung

Bei neuen Windenergieanlagen an Land werden immer häufiger Hybriddürme verwendet, die im unteren Teil aus vorgespannten Betonsegmenten und im oberen Teil aus Stahl bestehen. Dadurch werden Transportprobleme umgangen, die bei reinen Stahltürmen auftreten. Zusätzlich werden hohe Kosten für den Aufbau reduziert, wie sie bei Gittertürmen anfallen. Für die schwingungsbasierte Strukturüberwachung sind bei Hybriddürmen neben den üblichen, dichtbenachbarten Biegemoden auch die Imperfektionen infolge von Welligkeiten der Fugenoberfläche zu beachten [9]. Diese Imperfektionen können das Tragverhalten beeinflussen. In dieser Studie sollen Veränderungen der Eigenfrequenzen und Eigenformen aufgrund von Veränderungen der Vorspannung untersucht werden.

Für die Identifikation von Eigenfrequenzen und Eigenformen einer Struktur werden bei realen Bauwerken häufig betriebliche Modalanalyseverfahren verwendet, die keine Kenntnis über die Anregung der Struktur benötigen. Eine große Herausforderung rotationssymmetrischer Turmstrukturen sind dabei im Frequenzraum dichtbenachbarte Eigenmoden. Die weit verbreitete Frequency Domain Decomposition (FDD) Methode kann für dichtbenachbarte Moden nicht verwendet werden. Die Stochastic Subspace Identification (SSI) Methode liefert bei dichtbenachbarten Moden komplexe Eigenformen mit mehreren Hauptphasen je Raumrichtung, sodass die Eigenformen nicht fehlerfrei in den realen Raum transformiert werden

kann [8, 6] und somit eine physikalische Interpretation und ein Vergleich mit einem Finite Elemente (FE) Modell schwierig ist. Daher wird in dieser Studie die Bayesian Operational Modal Analysis (BAYOMA) verwendet [1], mit der schon einige Untersuchungen von Unsicherheiten von dichtbenachbarten Eigenmoden erfolgt sind [4]. Theoretische Untersuchungen ergaben, dass die größte Unsicherheit der Modenform in der Ausrichtung im Modenunterraum besteht [2] und dass kleinste Änderungen insbesondere die Ausrichtung verändern [3].

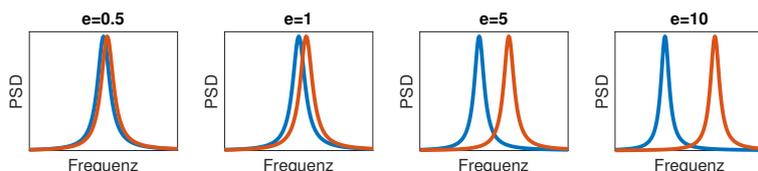
In diesem Beitrag wird anhand eines großmaßstäblichen Versuchs im Testzentrum Tragstrukturen Hannover (TTH) der Einfluss der Imperfektionen der Fugen eines vorgespannten, segmentierten Betonturms auf die Gesamtdynamik untersucht. Hierfür werden zunächst in Kapitel 2 Metriken zur Bewertung dichtbenachbarter Eigenmoden vorgestellt. Im folgenden wird der großmaßstäbliche Laborversuch sowie das FE Modell erläutert. Anschließend folgt die Untersuchung der identifizierten Eigendynamik im Vergleich zur Eigendynamik des FE Modells.

## 2 Metriken zur Bewertung dichtbenachbarter Moden

Die Nähe zweier Eigenmoden  $j$  und  $k$  kann durch den Abstand der zugehörigen Eigenfrequenz sowie der Halbwertsbreite beider Eigenmoden ausgedrückt werden. Daher sind neben den Eigenfrequenzen  $f$  auch die Dämpfungsverhältnisse  $\zeta$  notwendig, um die Nähe zu bestimmen. Für annähernd gleich gedämpfte Moden kann der Modendistanzfaktor  $e_j$  für die Eigenmode  $j$  wie folgt berechnet werden [2]

$$e_j = \left| \frac{f_k - f_j}{f_j \zeta_j} \right|. \quad (1)$$

Eine Visualisierung des Modendistanzfaktors ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei Modendi-



**Abbildung 1:** Visualisierung des Autoleistungsdichtespektrums (PSD) von zwei Eigenmoden mit verschiedenen Modendistanzfaktoren

stanzfaktoren kleiner gleich 1 liegen die Eigenfrequenzen innerhalb der Halbwertsbreite, was darauf hindeutet, dass die Eigenmoden dichtbenachbart sind. Im Fall von  $e = 10$  sind die Eigenmoden gut separiert.

Für den Vergleich der Eigenformen ist das weit verbreitete Modal Assurance Criterion (MAC) für dichtbenachbare Moden nur bedingt geeignet. Stattdessen kann der sogenannte Subspace of Order 2 MAC (S2MAC) [5] verwendet werden. Dieser vergleicht einen zweidimensionalen Modenunterraum  $[\psi_k \psi_m]$  mit einer Eigenform  $\varphi_j$ . Bei nahezu rotationssymmetrischen

Turmstrukturen wird der Modenunterraum näherungsweise durch die beiden Biegemoden aufgespannt. Für rein reellwertige Eigenformen lautet der S2MAC

$$\text{S2MAC}_{j,k,m} = \frac{(\varphi_j^T \psi_k)^2 - 2(\varphi_j^T \psi_k)(\psi_k^T \psi_m)(\varphi_j^T \psi_m) + (\varphi_j^T \psi_m)^2}{1 - (\psi_k^T \psi_m)^2}. \quad (2)$$

Die Beschleunigungen werden in  $x$ - und  $y$ -Richtung in allen Messebenen (ML) gemessen. Dementsprechend kann der Richtungswinkel  $\gamma$  einer Biegeeigenform wie folgt berechnet werden [6]

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-V_{12}}{V_{22}}\right) \text{ with } USV^T = [\varphi_x \ \varphi_y]. \quad (3)$$

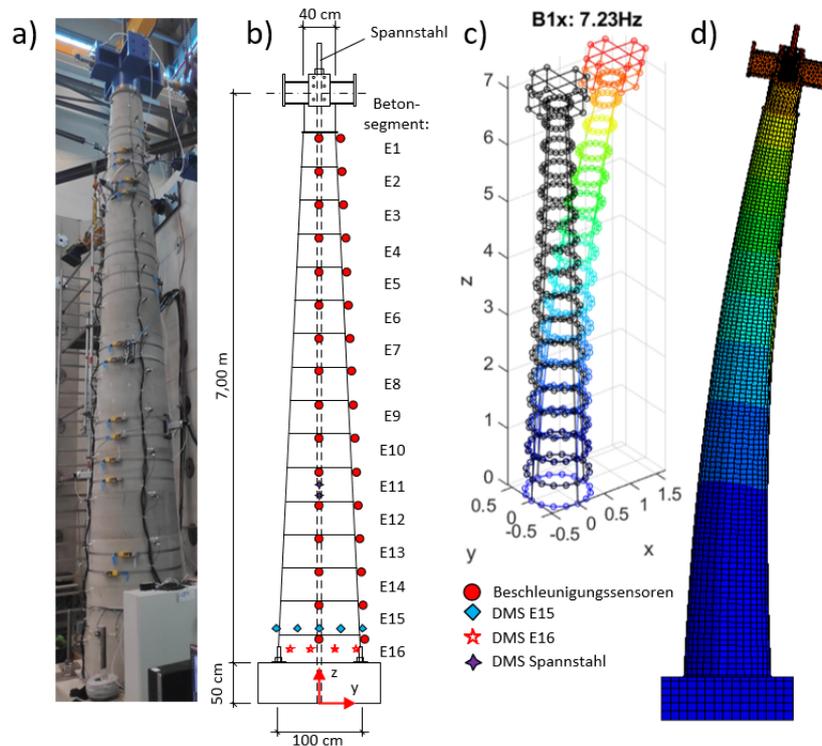
Dabei ist  $USV^T$  die Singulärwertzerlegung und  $V_{12}$  sowie  $V_{22}$  sind die entsprechenden Elemente der Matrix  $V$ .  $\varphi_x$  sind die Einträge der Modenform in  $x$ -Richtung und  $\varphi_y$  sind die Einträge der Modenform in  $y$ -Richtung. Bei Biegemoden entspricht der Winkel näherungsweise der Ausrichtung der Modenform im Modenunterraum und ist daher mit größerer Unsicherheit behaftet.

### 3 Großmaßstäblicher Laborversuch

Der Laborversuch eines 7.5 Meter hohen, segmentierten, vorgespannten Betonturms wurde im Spannungsfeld des Testzentrum Tragstrukturen Hannover (TTH) durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Betonturm besteht aus 16 Ringsegmenten (E1- E16), an denen jeweils zwei IEPE Beschleunigungssensoren radial in  $x$ - und  $y$ -Richtung messen. Zur Bestimmung der Vorspannkraft sind Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Messung der Normaldehnung am Spannstahl befestigt. Die Identifikation der modalen Parameter erfolgt nur mit Anregung aus dem Betrieb im TTH mittels der betrieblichen Modalanalyse. Zur Bestimmung der Fugenimperfectionen sind 8 DMS direkt oberhalb der untersten Fuge am Ringsegment E15 befestigt. Zusätzlich sind in der Mitte von Ringsegment E16 8 DMS angebracht, um einen Vergleich der Dehnungsverteilung ohne Fugenimperfectionen zu erhalten. Eine detailliertere Versuchsbeschreibung ist in [6] zu finden.

### 4 Finite Elemente Modell

Auf Grundlage der Konstruktionsdaten des experimentellen Hybridturms wurde ein Finite Elemente (FE) Modell in der Software Abaqus erstellt. Das Modell wurde mithilfe von Volumenelementen mit linearen Ansatzfunktionen aufgebaut. Die Betonsegmente wurden mittels Hartkontakt-Nebenbedingungen verbunden. Der Fundamentblock ist als unverschieblich an der Basis angenommen und der Spannstahl wurde mittels Nebenbedingungen an Turmkopf und Fundamentblock fixiert. Im Modell wird zunächst die Längung des Spannstahls mittels einer definierten Anzugskraft simuliert, bevor eine Modalanalyse am linearisierten System im Eigenspannungszustand durchgeführt wird. Abbildung 2b zeigt das Verschiebungsfeld der ersten Biegemode des FE Modells.

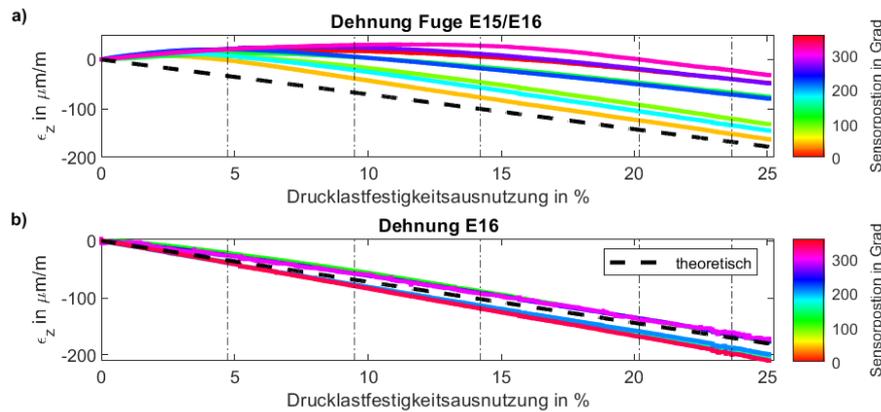


**Abbildung 2:** a) Versuchsaufbau des segmentierten, vorgespannten Betonturms, b) Zeichnung des Turms mit Sensorplan, c) identifizierte erste Biegeeigenfrequenz bei 5% Drucklastausnutzung (DA), d) Verschiebungsfeld der ersten Biegemode des FE Modells.

Die Geometrie der Bauteile sowie die Materialeigenschaften wurden nach Zeichnung bzw. Tabellenwerten angenommen. Etwaige Fertigungsabweichungen sind daher nicht berücksichtigt. Anbauteile wie Sensoren, Kabel und Aktuatoren sind im FE Modell ebenfalls nicht berücksichtigt. Diese Abweichungen zum realen Laborversuch existieren insbesondere in der Modellierung der Fugen zwischen den Betonsegmenten, welche im FE Modell als perfekt glatt angenommen werden, real allerdings Imperfektionen aufweisen.

## 5 Ergebnisse

In diesem Laborexperiment wird untersucht, welchen Einfluss die Fugenimperfektionen bei verschiedenen Vorspanngraden auf die Eigendynamik des Systems haben. Die Untersuchung der Imperfektionen erfolgt an der größten Fugenfläche, da an dieser durch die geringste Pressung relevante Imperfektionen zu erwarten sind. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 3 die Dehnung oberhalb der untersten Fuge am Ringsegment E15 und in der Mitte von Ringsegment E16 in Abhängigkeit der Vorspannung dargestellt. Die Vorspannkraft ist auf die Ausnutzung der maximalen Drucklastfestigkeit (DA) der kleinsten Fugenfläche zwischen den



**Abbildung 3:** Abhängigkeit der Dehnung von der Vorspannung a) an der Fuge zwischen Ringsegmenten E15 und E16 und b) in der Mitte von Ringsegment E16.

Ringsegmenten E1 und E2 bezogen. Die in Abbildung 3a dargestellten Dehnungen deuten darauf hin, dass die Lastübertragung zwischen den Fugen an den verschiedenen Messpunkten bei unterschiedlichen Vorspanngraden beginnt. Dies weist auf Unebenheiten in den Fugen hin und steht im Einklang mit den Ergebnissen von Klein et al. [7]. Die erwartete lineare Beziehung setzt bei einer Drucklastfestigkeitsausnutzung über 17% für alle DMS ein. Die Dehnungsverteilung ist in der Mitte des Ringsegments E16 (Abbildung 3b) homogener, was durch eine lineare Beziehung zwischen Dehnung und Vorspannung bei niedrigeren Vorspannwerten deutlich wird. Zudem stimmt die erwartete Dehnung mit den Messwerten deutlich besser überein. Dennoch gibt es Abweichungen in der Dehnungsverteilung über dem gesamten Querschnitt, was auf ein inhomogenes Material hinweist. Darüber hinaus kann es sich auch um Auswirkungen der Imperfektionen der Fugen handeln. Die Auswirkung der Imperfektionen auf die Biegeeigenfrequenz wird in dieser Studie für fünf Vorspanngrade (DA von 5%, 9%, 14%, 20% und 24%) untersucht, die in Abbildung 3 mit einer gestrichelten Linie markiert sind. Die Vorspannung bei Windenergieanlagen liegt in etwa bei 25% der Druckfestigkeit des Betons, sodass der höchste untersuchte Vorspanngrad in etwa der Ausnutzung einer Windenergieanlage entspricht.

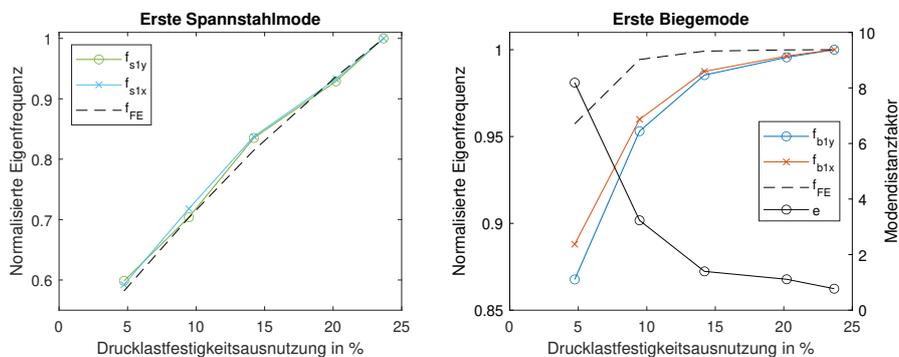
## 5.1 Einfluss der Vorspannung auf die Eigenfrequenzen

Für die verschiedenen Vorspannungen werden die erste Spannstaahlmode sowie die erste Biegemode genauer untersucht. Durch den rotationssymmetrischen Turmaufbau treten im (idealen) FE Modell zwei identische Eigenfrequenzen auf. Die ermittelten Eigenfrequenzen aus dem FE Modell und dem Laborversuch sind in Tabelle 1 aufgelistet. Wie häufig der Fall, sind die Eigenfrequenzen im FE Modell höher als im Laborversuch. In Abbildung 4 sind daher die untersuchten Eigenfrequenzen auf den höchsten Vorspanngrad normiert. Der qualitative Zusammenhang von Vorspannung und Spannstaahlmoden ist im FE Modell sowie im Laborversuch nahezu linear. Auf die Spannstaahlmoden haben die Fugenimperfektionen demnach keinen Einfluss.

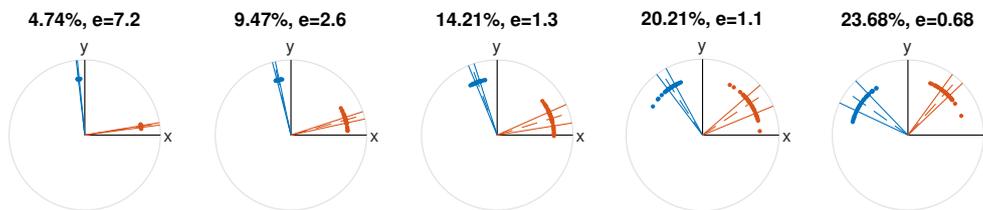
DA in %	Spannstahlmode in Hz			Biegemode, Eigenfrequenzen in Hz				
	$f_{0EXP}$		$f_{0FE}$	$f_{0EXP}$		$f_{0FE}$	MAC	S2MAC
	x	y		x	y		x; y	x; y
5	8.48	8.37	9.40	7.07	7.26	8.05	0.8214; 0.7561	0.9994; 0.9990
9	9.97	10.15	11.37	7.77	7.84	8.36	0.7507; 0.6474	0.9995; 0.9992
14	11.83	11.84	13.17	8.03	8.07	8.40	0.5793; 0.6329	0.9995; 0.9992
20	13.16	13.19	15.14	8.12	8.14	8.40	0.5372; 0.5721	0.9996; 0.9993
24	14.17	14.14	16.16	8.15	8.17	8.41	0.9076; 0.9904	0.9994; 0.9993

**Tabelle 1:** Identifizierte und berechnete Eigenfrequenzen sowie Modenformvergleich anhand des MAC und S2MAC für die untersuchten Vorspanngrade.

Anders sieht es bei den Biegemoden aus. Bei geringer Vorspannung sind die experimentell identifizierten Biegemoden im Frequenzbereich gut voneinander getrennt. Mit zunehmender Vorspannung nimmt der Abstand im Frequenzbereich zwischen den Biegemoden ab. Außerdem nehmen die Eigenfrequenzen zu. Dieser Effekt nimmt mit höheren Vorspannungen ab. Die Ursachen für diesen Effekt sind wahrscheinlich die Imperfektionen in den Fugen. Bei geringer Vorspannung beteiligen sich nur Teile der Fugenfläche an der Lastübertragung, was zu einer asymmetrischen Steifigkeit in den Biegerichtungen führt. Mit zunehmender Vorspannung trägt eine größere Fläche zur Lastübertragung bei, sodass die Steifigkeit symmetrischer wird. Dadurch nähern sich die Eigenfrequenzen an. Die Ursache für den Verlauf der Biegeeigenfrequenzen des FE Modells liegt vermutlich in der Veränderungen der Eigenspannung im System aufgrund der Vorspannung. Eine genauere Betrachtung wird in zukünftigen Arbeiten angestrebt.



**Abbildung 4:** Vergleich des Einflusses der Vorspannung auf die erste Eigenfrequenz des Spannstahls und die Biegeeigenfrequenz zwischen Messung und FE Modell; jeweils normiert auf den höchsten Vorspanngrad.



**Abbildung 5:** Ausrichtung der ersten Biegeeigenform in Abhängigkeit der Vorspannung

## 5.2 Einfluss der Vorspannung auf die Eigenformen

Die Untersuchung der Modenform erfolgt nur für die erste Biegemode des Turms, die in Abbildung 2 dargestellt ist. In Tabelle 1 sind die MAC und S2MAC Werte zwischen FE Modell und Laborversuch aufgelistet. Es ist deutlich ersichtlich, dass die S2MAC Werte höher sind. Ein Grund liegt in der Hauptschwingrichtung der Biegeform im Laborversuch, die in Abbildung 5 für 40 Messungen dargestellt ist. Mit zunehmender Vorspannung drehen sich die Modenformen leicht gegen den Uhrzeigersinn. Dies unterstützt die theoretischen Überlegungen von Brincker et al. [3], die besagen, dass eine Rotation der Modenformen im Modenunterraum beim Übergang von gut getrennten Moden zu eng beieinander liegenden Moden beobachtet werden kann. In diesem Laborversuch ist die Hauptschwingrichtung nahezu äquivalent zum Ausrichtungswinkel von der Eigenform im Modenunterraum. Es ist auch ersichtlich, dass die beobachteten Unsicherheiten zunehmen. Dies führt zu niedrigen MAC Werten, aber weiterhin hohen S2MAC Werten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Studie untersucht den Einfluss von Fugenimperfectionen auf die erste Biegemode eines vorgespannten, segmentierten Betonturms in einem großmaßstäblichen Laborexperiment. Die Vorspannung muss so stark sein, dass die gesamte Fuge tatsächlich geschlossen ist, um die theoretische Biegesteifigkeit und somit die geplante Biegeeigenfrequenz zu erhalten. Die notwendige Vorspannung hängt also von der Beschaffenheit der Fugenoberfläche ab. Um dieses Verhalten besser im FE Modell abzubilden, sollten zukünftig die Imperfectionen der Fuge genauer abgebildet werden. Zudem wurde in dem Beitrag experimentell gezeigt, dass die Identifikation der Modenform von dichtbenachbarten Eigenmoden unsicher ist. Insbesondere die Hauptschwingrichtung kann sich verändern und nicht mit dem FE Modell übereinstimmen. Für einen Vergleich der Formen bietet sich daher anstelle des häufig verwendeten MAC der S2MAC an. Bei realen Türmen von Windenergieanlagen sind die Eigenmoden aufgrund der Aufhebung der Symmetrie durch die Rotoren weniger dichtbenachbart, wie im rotations-symmetrischen Aufbau des Laborversuchs. Allerdings treten andere Herausforderungen bei der betrieblichen Modalanalyse auf, wie die aerodynamische Dämpfung sowie eine relativ kurze Messzeit bezogen auf die Schwingperiode, die aufgrund der Zeitvarianz des Systems nur möglich ist. Diese werden in zukünftigen Arbeiten für das schwingungsbasierte Monitoring von Stahl-Beton-Hybridtürmen von Windenergieanlagen untersucht.

## Danksagung

Wir möchten uns für die Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (*HyTowering - Optimierung der Bemessung hybrider Türme und Entwicklung eines geeigneten Monitoringkonzepts zur Schadensdetektion und -quantifizierung*, FKZ 0324221A und *SMARTower - Bemessung und Lebensdauerüberwachung modularer Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen*, FKZ 03EE2041C) bedanken, welche diese Arbeit ermöglichte.

## Literatur

- [1] AU, S.-K. : *Operational Modal Analysis: Modeling, Bayesian Inference, Uncertainty Laws*. 1. Singapore : Springer Singapore, 2017. – ISBN 978–981–10–4117–4
- [2] AU, S.-K. ; BROWNJOHN, J. M. ; LI, B. ; RABY, A. : Understanding and managing identification uncertainty of close modes in operational modal analysis. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 147 (2021), S. 107018. – ISSN 08883270
- [3] BRINCKER, R. ; LOPEZ-AENLLE, M. : Mode shape sensitivity of two closely spaced eigenvalues. In: *Journal of Sound and Vibration* 334 (2015), S. 377–387. – ISSN 0022460X
- [4] BROWNJOHN, J. M. W. ; RABY, A. ; AU, S.-K. ; ZHU, Z. ; WANG, X. ; ANTONINI, A. ; PAPPAS, A. ; D'AYALA, D. : Bayesian operational modal analysis of offshore rock lighthouses: Close modes, alignment, symmetry and uncertainty. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 133 (2019), S. 106306. – ISSN 08883270
- [5] D'AMBROGIO, W. ; FREGOLENT, A. : Higher-order MAC for the correlation of close and multiple modes. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 17 (2003), Nr. 3, S. 599–610. – ISSN 08883270
- [6] JONSCHER, C. ; LIESECKE, L. ; PENNER, N. ; HOFMEISTER, B. ; GRIESSMANN, T. ; ROLFES, R. : Influence of system changes on closely spaced modes of a large-scale concrete tower for the application to structural health monitoring. In: *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 29 (2023), Nr. 8, S. 328. – ISSN 2190–5452
- [7] KLEIN, F. ; FÜRLL, F. ; BETZ, T. ; MARX, S. : Experimental study on the joint bearing behavior of segmented tower structures subjected to normal and bending shear loads. In: *Structural Concrete* 23 (2022), Nr. 3, S. 1370–1384. – ISSN 1464–4177
- [8] LIESECKE, L. ; JONSCHER, C. ; GRIESSMANN, T. ; ROLFES, R. : Investigations of Mode Shapes of Closely Spaced Modes from a Lattice Tower Identified Using Stochastic Subspace Identification. In: *International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures* Springer, 2023, S. 529–538
- [9] THEILER, W. ; REICHT, O. ; TUE, N. V.: Auswirkungen von Unebenheiten bei trockenen Druckverbindungen von Betonbauteilen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), Nr. 10, S. 687–698. – ISSN 00059900