

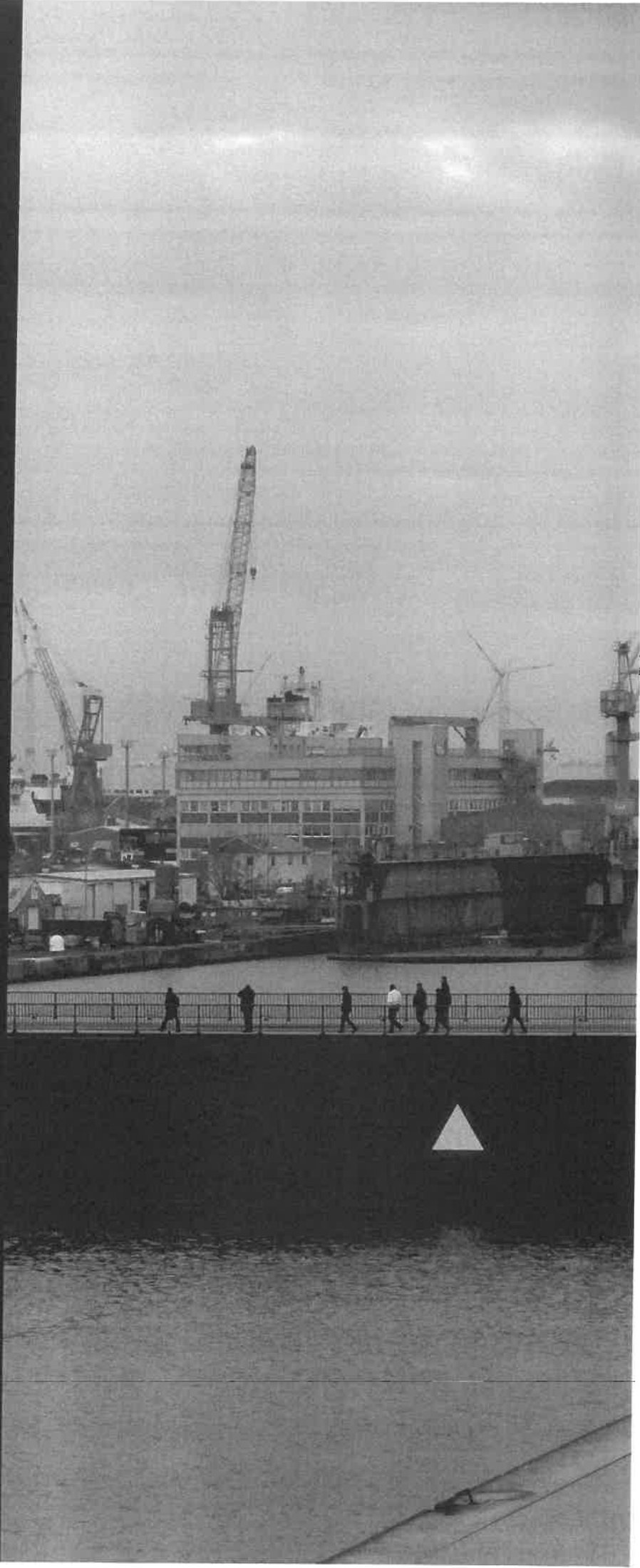
www.exzellents-bid.de

Exzellents

Sonderausgabe

Bauen in Deutschland

12. Stahlwasserbau Tagung



Potentiale smarterer Sensornetzwerke für die Überwachung im Stahlwasserbau

Fraunhofer-Institut, Darmstadt

In den letzten Jahren werden zunehmend verteilte Sensornetzwerke für große Strukturen wie Brücken oder Windenergieanlagen oder für Anwendung in Verkehrsträgern wie Nutzfahrzeuge, Züge oder Flugzeuge entwickelt. Sie sollen für die Überwachung kritischer Komponenten eingesetzt werden, um zum einen kritische Schäden zu erfassen oder Vorhersagen zu können und zum anderen um die notwendigen Wartungsintervalle einer Struktur dem tatsächlichen Alterungs- und Verschleißzustand dynamisch anzupassen. Derartige Sensornetzwerke bestehen aus einer großen Anzahl von Sensorknoten, welche energieautark sein sollten, worauf die gemessenen Daten vorverarbeitet werden können und welche untereinander drahtlos kommunizieren können. Im Rahmen des LOEWE-Zentrums „Adaptronik – Research, Innovation, Application (AdRIA)“, gefördert durch das Land Hessen im Rahmen des LOEWE-Programms, wurden in Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer LBF, der TU Darmstadt und der Hochschule Darmstadt Lösungen für diese smarten Sensornetzwerke entwickelt und an Brücken, Windenergieanlagen und Zügen erprobt. Im Rahmen dieses Beitrags werden die jeweiligen Lösungen kurz vorgestellt und ihre Übertragbarkeit auf den Stahlwasserbau (Brücken, Deiche) diskutiert.

Im Unterschied zu anderen Methoden der Schadenserkennung wie die klassische zerstörungsfreie Prüfverfahren wird das **Structural Health Monitoring (SHM)** üblicherweise auf Strukturschäden unbekannter Art, unbekanntem Ausmaß

und unbekanntem Ort angewendet. **Condition Monitoring (CM)** dagegen nimmt eine geringe Variabilität der Betriebsbedingungen und wohlbekannte Schadensarten an bekannten Orten an. Bedingt durch die schwer vorhersagbaren Belastungen durch Umgebungseinflüsse wie Wind und Regen sind daher eher Verfahren des SHM als die des CM für die Überwachung von Brücken oder Deichen geeignet. Insbesondere für Brücken finden sich in der Literatur SHM-Konzepte mit einem vergleichsweise hohen Technologiereifegrad (TRL). Motiviert werden die Arbeiten durch die Tatsache, dass eine Großzahl von Brücken ihre vorgesehene Lebensdauer erreicht oder bereits überschritten haben. In Asien ist es bereits Pflicht, regelmäßig den Zustand der Brücke zu überprüfen, welches mit hohen Kosten verbunden ist. Daher wird eine automatisierte Überwachung und Schadenserkennung angestrebt. Mittlerweile sind weltweit ca. 40 Brücken mit Spannweiten von 100 m oder länger mit einem Langzeitüberwachungssystem ausgestattet worden, welches neben Wetterbedingungen wie Wind und Feuchte vor allem Schwingungen erfasst [1,2]. Als weiteres wichtiges Anwendungsfeld gelten Windenergieanlagen, und von diesen insbesondere Off-Shore installierte, da deren Wartungskosten einen erheblichen Anteil der Lebenszykluskosten darstellt. Um deren Verfügbarkeit zu erhöhen werden insbesondere für die stetig in Größe wachsenden Rotorblätter Überwachungssysteme entwickelt, um frühzeitig Schäden zu erkennen [3]. Für die

Der Autor



Thilo Bein

ist Leiter des Bereichs „Wissenschaftsmanagement“ des Fraunhofer LBF in Darmstadt, welchem er seit 2001 angehört. In dieser Funktion verantwortet und koordiniert er unter anderem alle öffentlich geförderten Projekte in den vier Geschäftsfeldern Automotive, Transport, Maschinen- und Anlagenbau sowie Energie, Umwelt und Gesundheit.

Mitautoren:

Dirk Mayer, Thomas Siebel,
Michael Koch, Fraunhofer LBF
Andreas Engel, TU Darmstadt

Überwachung der Leistungsparameter elektrischer Komponenten sowie der absoluten Rotorposition, Gondelschwingungen und Vibrationen in den Lager und Getrieben gibt es bereits kommerzielle Lösungen [4].

Eine Vielzahl von SHM-Ansätzen basieren darauf, aus Änderungen des Schwingungsverhaltens der Struktur auf Schäden in dieser zu schließen. Schwingungsbasierte SHM-Konzepte eignen sich besonders für große Strukturen wie Gebäude, Brücken oder Windenergieanlagen. Viele der vorgeschlagenen Methoden identifizieren dabei strukturdynamische Parameter von Schwingungsmessungen an der Struktur. Die meisten Strukturen, die überwacht werden müssen, können jedoch für eine Analyse des strukturdynamischen Verhaltens nicht gezielt angeregt werden. Entweder sind sie zu groß oder es kann im Betrieb kein Schwingerreger angebracht werden. Dementsprechend liegen für die schwingungsbasierte Schadensüberwachung nur die Betriebsschwingformen zur Ver-

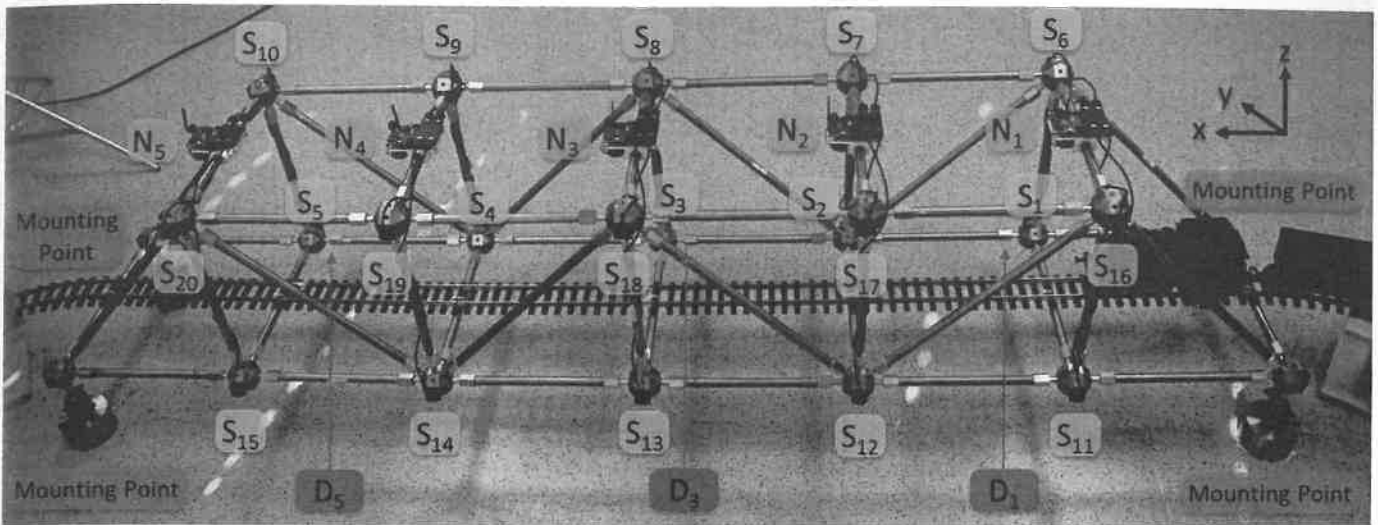


Bild 1: Modellbrücke mit den Sensoren (Si), Sensorknoten (Ni) und Schadensorten (Di)

fügung, die durch die realen Betriebslasten hervorgerufen werden. Hierfür kann die sogenannte **Random Decrement (RD)** Methode eingesetzt werden [5], welche sich auch für die Signalverarbeitung auf den Sensorknoten eignet. Die RD-Methode ist ein einfaches Verfahren, welches die an der Struktur gemessene zeitlich abhängige Strukturantwort aufgrund einer zufälligen Anregung mittelt. Zu jedem Zeitpunkt kann die Strukturantwort durch drei Anteile beschrieben werden: Anfangsverformung, Anfangsgeschwindigkeit und der Antwort aufgrund der zufälligen Anregung in dem Zeitintervall der Anfangsbedingung bis zum Messzeitpunkt [6]. Durch die Mittelung über eine Vielzahl dieser Zeitintervalle verschwindet der zufällige Anteil der Strukturantwort während die verbleibende Größe als Systemantwort aufgrund der Anfangsbedingung aufgefasst werden kann. Diese Größe enthält somit alle gewünschten Informationen über das Systemverhalten. Dieses Verfahren wurde in den folgenden Beispielen angewendet.

Labordemonstrator Brücke

Um das SHM-Konzept auf Basis der RD-Methode zu validieren, wurde eine Modellbrücke als Stabtragwerk aus 54 Stäben und 24 Knoten aufgebaut (Bild 1). Die Brücke hat eine Querschnittsfläche von $0,41 \times 0,41 \text{ m}^2$ und eine Länge von 2,46 m und wiegt 51,4 kg. Schäden an der Brücke werden durch lösen der Schraubenschlüsse D 1 – 3. Angeregt wird die Brücke durch eine Modelleisenbahn (g-scale) mit einem Gewicht von 2,3 kg und einer Geschwindigkeit bis zu 0,86 m/s. Als Sensornetzwerk wurden fünf batteriegetriebene, eigens entwickelte Sensorknoten und 20 eingehauste MEMS-Beschleunigungssensoren eingesetzt. Jeder Sensorknoten verarbeitet vier Beschleunigungssignale in z-Richtung für eine Frequenz von 400 Hz. Zur Kommunikation des Sensornetzwerkes mit einem Industrierechner wurde eine drahtlose Kommunikation verwendet. Die RD-Methode wurde auf den Sensorknoten implementiert und damit die erste vertikale Eigenschwingform der Modell-

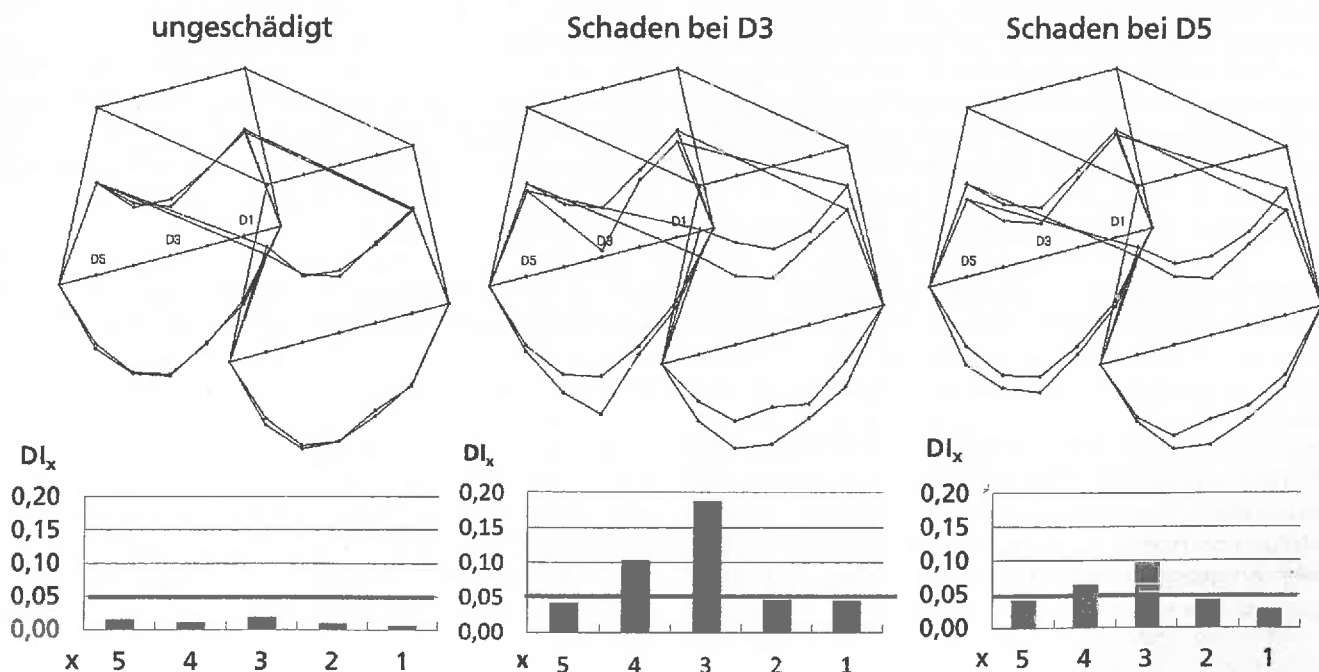


Bild 2: Erfasste Schäden und zugehöriger Schadensindex (DI)

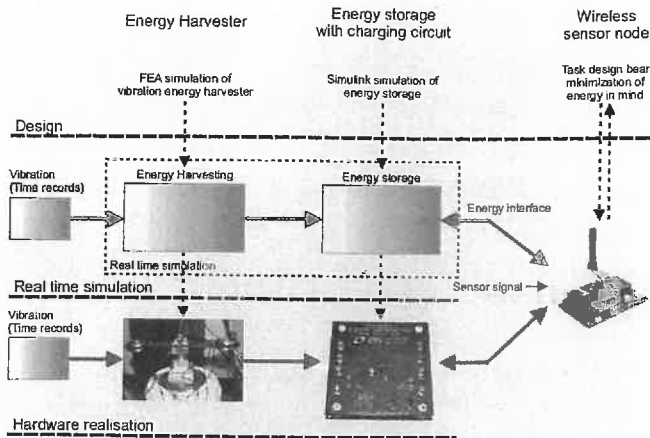


Bild 3: Hardware-in-the-Loop Entwicklung eines Energy Harvester für einen smarten Sensorknoten

brücke ermittelt. Für alle drei Schadensorte konnte der Schaden automatisch detektiert werden (Bild 2), der Ort des Schadens wird dabei näherungsweise durch den berechneten Schadensindex bestimmt.

Energieversorgung von smarten Sensornetzwerken

Für die Überwachung von kritischen Stellen wird meist ein energie-autarkes Sensorsystem benötigt. Ein solarbetriebenes System scheidet dabei aus, da an den kritischen Stellen wie z. B. Lager und Übergangskonstruktionen von Brücken keine Sonne hingelangt. Eine Möglichkeit der Energiegewinnung ist dabei die Wandlung von mechanischen Schwingungen in eine elektrische Spannung über einen piezoelektrischen Wandler. Üblicherweise werden solche **Energy Harvester** als schwingungsfähige, einseitig eingespannte Biegebalken mit einer Endmasse ausgeführt (siehe auch Bild 3). Ein derartiger **Energy Harvester** wurde für ein Monitoringsystem nach obigen Konzept für die Überwachung der Übergangskonstruktion der Lahntal-Autobahnbrücke ausgelegt [7]. Mit diesem **Energy Harvester** (Masse < 500 g, Länge ≈ 12 cm) konnte über die natürliche Schwingung der Lahntal-Brücke dreimal so viel Energie generiert werden als vom Sensorknoten benötigt wird.

Ein vergleichbares System wurde ebenfalls für die automatische Heißläuferdetektion bei Güterwagons entwickelt. Heißläufer sind Ursache für viele Unfälle, so dass in vielen Ländern fest installierte Heißläufer-Detektoren verwendet werden. Diese werden aber nur alle 30-40 km oder vor kritische Stellen wie Tunnel platziert. Was zwischen zwei Detektoren passiert, kann nicht erfasst werden. Daher sind fahrzeugseitige Sensoren zu bevorzugen wobei jedoch bei konventionellen Güterwagons keine Stromversorgung vorhanden ist. Aufgrund der geforderten langen Lebensdauer und durchaus lange Fahrzeiten sind batteriebetriebene Sensorsysteme nicht praktikabel. Stattdessen werden energieautarke, drahtlose Sensorknoten gefordert, wobei die notwendige Energie aus Schwingungen gewonnen werden kann. Die Machbarkeit eines energie-autarken Heißläufer-Detektors wurde mittels Hardware-in-the-Loop Methoden nachgewiesen (Bild 3). Mittels des in Bild 3 dargestellten Ansatzes wurde ein **Energy Harvester**, ein Energiespeicher und der smarte Sensorknoten in die HIL-Testplattform

integriert und mit realen Betriebslasten, gemessen über 23 km zwischen Worms und Bensheim, betrieben. Es konnte gezeigt werden, dass alle 10 km ausreichend Energie generiert wurde, um eine Temperaturmessung durchzuführen und an ein Back-Office drahtlos zu übermitteln.

Übertragung auf den Stahlwasserbau

Die oben beschriebenen Konzepte lassen sich ohne weiteres auf Stahlbrücken oder vergleichbare Konstruktionen des Stahlwasserbaus übertragen. Offene Fragestellungen ergeben sich jedoch in Hinblick auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der smarten Sensornetzwerke. Auch wenn diese Systeme nachträglich angebracht bzw. einfach ausgetauscht werden können, sollten sie doch 10 oder mehr Jahre reibungsfrei funktionieren. Insbesondere feuchte und salzhaltige Umgebungsbedingungen stellen dabei eine Herausforderungen dar. Die Lebensdauer der **Energy Harvester** konnte dagegen im Labor als unkritisch nachgewiesen werden, die piezoelektrischen Wandler sind bei geeigneter Kapselung sehr schadenstolerant. Es ist jedoch davon auszugehen, dass schwingungsbasierte Überwachungskonzepte nicht alleinig ausreichen, um alle mögliche Schäden oder Degradationen einer Stahlkonstruktion zu erfassen. Innerhalb des LOEWE-Zentrum AdRIA wurden auch Impedanz-basierte Verfahren betrachtet, die unter anderem zur Erfassung der Korrosion angedacht werden. Die dafür notwendigen Sensoren lassen sich ebenfalls an die smarten Sensorknoten anschließen, so dass ein Sensornetzwerk wird verschiedenen, den Bedarf angepassten Sensortypen aufgebaut werden kann.

Die Anwendung der Random-Decrement-Methode oder andere Strukturdynamische Verfahren wie die operationale Modalanalyse lassen sich prinzipiell auch auf Deiche übertragen. Allerdings liegt die Herausforderungen hier nicht auf dem Sensornetzwerk selbst sondern auf der Integration einer geeigneten Anregung, um die notwendigen strukturdynamischen Parameter anregen und erfassen zu können.

Referenzen

- [1] Farrar CR, Worden K (2007) An introduction to structural health monitoring. *Phil Trans R Soc A* 365: 303-315
- [2] Ko JM, Ni YQ (2005) Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures* 27: 1715-1725
- [3] Ciang CC, Lee JR, Bang HJ (2008) Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Meas. Sci. Technol.* 19
- [4] Caselitz P, Giebardt J (2005) Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters. *Journal of Solar Energy Engineering* 127: 253-61
- [5] Cole HA. On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement. CR-2205. NASA; 1973.
- [6] Rodrigues J, Brincker R. Application of the Random Decrement Technique in Operational Modal Analysis. *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference 2005.*
- [7] M. Koch, Methodische Auslegung energieautarker Systeme, Masterarbeit an der Hochschule Koblenz, 2012