

# Auswerteverfahren für eine frühzeitige Erkennung von sicherheitsrelevanten Defekten an tragenden Konstruktionen von Windenergieanlagen mit Beschleunigungssensoren – eine vergleichende Analyse

## Methods of Data Interpretation for Early Detection of Safety-related Defects in Bearing Constructions of Wind Turbines with Accelerometers – A Comparative Analysis

Boris Resnik

Für dynamisch stark beanspruchte Bauwerke ist ein effektives Monitoring von entscheidender Bedeutung. Obwohl sich eine vorbeugende Überwachung der meisten Bestandteile moderner Windenergieanlagen im Rahmen von sog. Condition-Monitoring-Systemen längst zu einem Standard entwickelt hat, befindet sich diese Vorgehensweise in Bezug auf ihre Fundamente und Türme erst in einer Entwicklungsphase. In den letzten Jahren wurden vom Autor sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen von unterschiedlichen Messverfahren der Überwachung dieser Art gezeigt und neue Wege vorgeschlagen. In diesem Beitrag werden die unterschiedlichen Möglichkeiten bei der Interpretation von Messergebnissen bei einer vollautomatischen Kontrolle mit modernen Beschleunigungssensoren behandelt. Die entwickelten Algorithmen der Datenauswertung werden anhand eines typischen Beispiels verglichen und analysiert.

**Schlüsselwörter:** Condition-Monitoring-System, Windenergieanlage, Betonfundament, Turm, Beschleunigungssensor, modale Analyse, statistische Analyse, Random Decrement Technique

*For dynamically heavy used wind turbines, an effective monitoring is of critical importance. Whereas a preventive monitoring of most components of modern wind turbines has already developed as a standard in the context of Condition Monitoring Systems, in terms of foundations and towers this approach is only in the development phase. In the last years, the author assessed both, the potential benefits as well as possible limitations of these methods and provided insights into new solutions. In this paper, the concrete algorithms of the interpretation for the measurement with help of the modern accelerometers are treated. These solutions for data evaluation are compared and analyzed using a typical example.*

**Keywords:** Condition Monitoring System, wind turbines, foundation, tower, accelerometer, modal analysis, statistical analysis, random decrement technique



Abb. 1 | Typische äußere Defekte von tragenden WEA-Konstruktionen

## 1 EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren hat sich angesichts vermehrt auftretender Fundament- und Turmschäden an modernen Windenergieanlagen (WEA) gezeigt, dass im Bereich der Turmeinbindung im Fundament und zwischen den einzelnen Sektionen von typischen Stahltürmen die kritischen Punkte der gesamten Bauwerkskonstruktion vorliegen. Ein typisches Schadensbild im ersten Bereich sind ein halbkreis- oder ein ringförmig um den Turm verlaufender Riss bzw. Abplatzungen an der Oberseite der Fundamente sowie Wassereintritt im Fundamentinneren (Abb. 1 oben). Die Ursache für diese Schäden sind zumeist irregulär große Bewegungen an Fundamenteinbauteilen (FET) der WEA, die z.B. aufgrund verdeckter Baumängel bei der Fundamentherstellung oder auch durch Planungsfehler hervorgerufen werden /Resnik 2015/. Es ist ebenfalls bekannt, dass es eine Vielzahl von Schäden an den Türmen von Windenergieanlagen gibt, von denen ein Großteil wie Lackschäden, Dellen und Kerben (Abb. 1, unten) im Rahmen von periodischen visuellen Kontrollen /Resnik 2014/ detektiert und ggf. mit relativ geringem Aufwand beseitigt werden kann. Die Fehlstellen bei den Ringflanschen und die begleitenden Rostschäden sind jedoch wesentlich kritischer und können zu erheblichen Schäden bis zum Einsturz der ganzen Anlage führen. Die Ursache für diese Defekte

sind zumeist irregulär große Bewegungen an den Flanschverbindungen der WEA, die z.B. durch verdeckte Transport- bzw. Konstruktionsmängel bei der Turmherstellung und einer enormen dynamischen Beanspruchung im Laufe von Jahren hervorgerufen werden. Je früher die genannten Schäden in den WEA-Fundamenten und -Türmen erkannt werden, desto größer ist das Spektrum von Möglichkeiten, einen ungeplanten Anlagenstillstand und eine kostspielige Sanierung zu verhindern.

Für die Beurteilung des Bauwerkszustands sowohl für die Fundamenteinbauteile als auch für die Flanschverbindungen soll vor allem die Frage beantwortet werden, ob der Turm der WEA im Fundament fest eingebunden bzw. die beiden Rohrsegmente fest miteinander verbunden sind. Die Erfassung von den relativen vertikalen bzw. horizontalen Bewegungen an diesen Stellen kann mit unterschiedlichen messtechnischen Mitteln wie mit Beschleunigungs- und Neigungssensoren, mit einem vertikal bzw. horizontal gerichteten Laser oder auch mit den zielverfolgenden Tachymetern /Resnik & Schiefelbein 2014 und 2013/ erreicht werden.

Das hier behandelte Messsystem besteht aus mehreren Beschleunigungssensoren, die für die Kontrolle der Fundament- bzw. Flanschverbindung derzeit nur innerhalb des Turms fest eingebaut (Abb. 2)

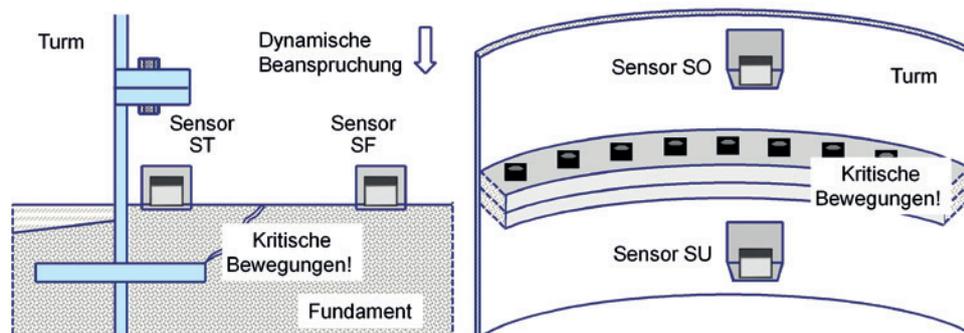


Abb. 2 | Messsystem für Monitoring auf Basis von Beschleunigungssensoren

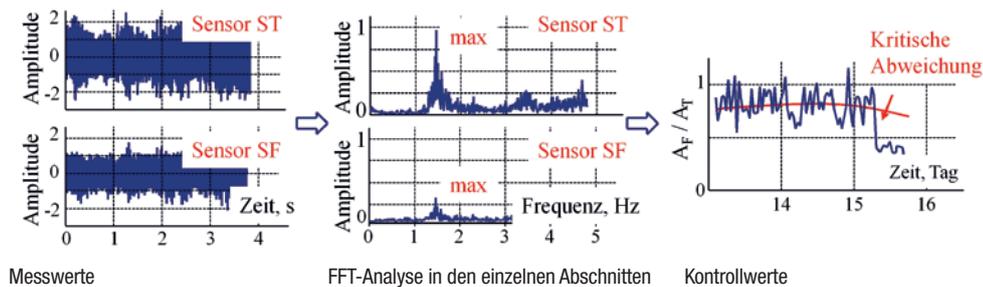


Abb. 3 | FFT-Konzept der CMS-Überwachung von Fundamenten

und mit einer Recheneinheit verbunden sind. Der Auswahl von Überwachungspunkten bei der Kontrolle ist erfahrungsgemäß eine besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Dieses Thema soll jedoch im Beitrag nicht näher behandelt werden. Im Folgenden werden die Messdaten von jeweils unterschiedlichen Paaren von Sensoren wie „Sensor am Turm, ST“ und „Sensor am Fundament, SF“ bzw. „Sensor oben, SO“ und „Sensor unten, SU“ ausgewählt, exemplarisch verarbeitet und interpretiert.

Es ist bekannt, dass die schlanken Bauwerke, wie Türme von WEA, mit niedrigen Eigenfrequenzen bei geringer Dämpfung aufgrund natürlicher Anregungsquellen, wie Wind oder Betrieb, in Schwingungen mit einer relativ großen Amplitude versetzt werden können. Diese Schwingungen werden im Turm und später vom Turm ins Fundament übertragen und können dort an unterschiedlichen Punkten bei laufendem Betrieb messtechnisch erfasst werden. Andere mögliche Quellen von Schwingungen wie Straßenverkehr oder auch Mikroseismik breiten sich vom Baugrund aus und können in der Regel vernachlässigt werden. Grundsätzlich kann vermutet werden, dass sich das erfasste Schwingungsverhalten von Punkt zu Punkt in Abhängigkeit vom Zustand der entsprechenden Verbindung zum Bauwerk unterscheidet und somit für das Ableiten von bestimmten Kontrollparametern in Bezug auf den Zustand der tragenden Konstruktionen geeignet ist.

## 2 VERFAHREN DER DATENANALYSE FÜR DIE ERKENNUNG SICHERHEITSRELEVANTER DEFEKTE

Durch die messtechnische Erfassung der dynamischen Charakteristik von Bauwerksschwingungen, kann das Langzeitverhalten und damit der Zustand tragender Konstruktionen über die Zeit beurteilt werden. In den letzten Jahren wurden vom Autor in Zusammenarbeit mit mehreren Wissenschaftlern, Ingenieurbüros und Betreibern von Windparks unterschiedliche Konzepte für die Lösung dieser Aufgabe entwickelt und getestet.

### 2.1 Konzept auf der Basis der FFT-Analyse

Bei der Analyse der Sensormesswerte nach dem hier präsentierten Konzept (Abb. 3) werden jeweils nur zeitlich begrenzte Ausschnitte des Signals einer konstanten Länge (z.B. 30 min) betrachtet. Da ein direkter Vergleich der Schwingungsamplituden

von Sensoren an unterschiedlichen Punkten des Fundaments oder Turms (z.B. Sensor ST direkt am Turm und Sensor SF außerhalb des

## Kassel documenta Stadt

Stadt Kassel  
Personal- und Organisationsamt  
34112 Kassel

Die in der Mitte Deutschlands gelegene Stadt Kassel mit ihren rund 200.000 Einwohnerinnen und Einwohnern gehört zu den landesweit wirtschaftlich dynamischsten Städten. Mit ihren attraktiven Sport-, Freizeit- und Kulturangeboten, dem Weltkulturerbe Bergpark Wilhelmshöhe und der landschaftlich reizvollen Lage im hessischen Bergland bietet Kassel eine hohe Lebensqualität.

Das Amt Vermessung und Geoinformation ist für das Geodatenmanagement der Stadt Kassel zuständig und unterstützt Stadtverwaltung, Wirtschaft, Bürgerinnen und Bürger mit aktuellen Geodaten und vielfältigen Dienstleistungen.

Für die Abteilung Geoinformation suchen wir

**eine/n Ingenieur/in (FH) / Bachelor of Science / Bachelor of Engineering**  
der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik

für das Sachgebiet Stadtgrundkarte und Geoinformation. Das Tätigkeitsfeld umfasst örtliche Topographievermessungen für das städtische GIS sowie Messungen im Ingenieur- und Katasterbereich, außerdem die Mitarbeit bei der Weiterentwicklung der Arbeitsverfahren.

Haben Sie Interesse, engagiert eine verantwortungsvolle und interessante Tätigkeit bei der Stadt Kassel auszuüben? Wir freuen uns über Ihre Bewerbung.

Die vollständige Ausschreibung finden Sie auf unserer Internetseite [www.stadt-kassel.de](http://www.stadt-kassel.de) unter der Rubrik „Aktuelles“ bei den Stellenangeboten.

Sofern Sie keinen Zugriff auf das Internet haben, können Sie den vollständigen Ausschreibungstext unter der Telefonnummer 0561 787 2098 anfordern.

**Bewerbungsschluss: 10. März 2017**

gefährdeten Bereichs, siehe Abb. 2) aufgrund zufälliger Ereignisse im betrachteten Zeitfenster meistens wenig aussagekräftig ist, werden die Messwerte zunächst in den Frequenzbereich überführt (Abb. 3). Die Untersuchung des Datenmaterials auf vorhandene Periodizitäten (wie Eigenfrequenzen und die dazugehörigen Amplituden) wird dabei mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) realisiert. In diesem Beitrag wird diese klassische Vorgehensweise nicht ausführlich behandelt und stattdessen auf die entsprechende Fachliteratur (z. B. /Heunecke et al. 2013/) verwiesen.

Das Frequenzerhaltungsprinzip von dynamischen Systemen besagt, dass in einer Ausgangsgröße (Schwingungen des Fundaments) nur Frequenzen enthalten sein können, die auch im Spektrum des Eingangs (Schwingungen des Turms) enthalten sind. Das heißt in diesem konkreten Fall, dass die Frequenzen bei beiden angebrachten Sensoren weitgehend übereinstimmen müssen. In den Spektrogrammen werden anhand der vorläufigen Untersuchung eine oder mehrere charakteristische Frequenzen (Eigenfrequenzen) definiert. Anhand der vorgegebenen Arbeitsfenster für jede solche Frequenz wird automatisch die maximale Amplitude ermittelt.

Da die absolute Größe der ermittelten Amplitude von zahlreichen Parametern wie Windstärke, Windrichtung und Ausrichtung der Gondel abhängig ist, kann sie kaum für eine Kontrolle verwendet werden. Bei dem entwickelten Konzept der Überwachung wird jedoch die Tatsache ausgenutzt, dass die äußeren Bedingungen für alle gleichzeitig benutzten Sensoren gleich sind. Beim letzten Schritt der Datenauswertung wird deswegen geprüft, ob die aktuellen Schwingungsamplituden für bestimmte Paare (hier exemplarisch Sensor ST und Sensor SF) in einem nachvollziehbaren Verhältnis zueinander stehen. Dieses Verhältnis der Amplituden für vordefinierte Frequenzen stellt somit den gesuchten CM-Kontrollparameter dar, mit dem im Laufe der Beobachtungszeit die signifikanten Unterschiede einer konkreten Anlage im Vergleich zu anderen Anlagen dieser Art bzw. Abweichungen zum bekannten „Normalverhalten“ festgestellt werden können.

## 2.2 Konzept auf der Basis der RDT-Analyse

Alle realen Tragwerke besitzen eine material- und konstruktionsbedingte Dämpfung, die z. B. bei einer einmaligen Anregung ein kontinuierliches Ausklingen der entstandenen Schwingungen bewirkt, bis schlussendlich eine „statische Ruhelage“ erreicht wird. Die Dämpfungseigenschaften sind frequenzabhängig und stellen eine für die Systemidentifikation maßgebende Größe dar. Eine erhöhte Dämpfung weist meistens auf eine Vergrößerung der Energiedissipation in den Bestandteilen des Tragwerks hin. Nach der Meinung vieler Experten (z. B. /Wenzel 2009/) ist eine Erfassung von solchen Änderungen zur frühzeitigen Detektion von Defekten von Baukonstruktionen besonders vielversprechend.

Das Dämpfungsverhalten eines Bauwerks kann durch eine einmalige starke Auslenkung (Deformation) der tragenden Konstruktionen und eine anschließende Analyse der folgenden freien Schwingungen erfasst und analysiert werden (z. B. /Petersen 2000/). Ein exponentielles Abklingen der Amplitude eines Schwingvorgangs bei einer Eigenfrequenz kann dabei z. B. durch die Gleichung:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega_d t + \phi_0) \quad (1)$$

beschrieben werden, wobei  $A_t$  die aktuelle Position zum Zeitpunkt  $t$ ,  $A_0$  die Anfangsauslenkung mit der Phasenverschiebung  $\phi_0$  sowie  $\omega_d$  die entsprechende Eigenkreisfrequenz unter Berücksichtigung der Dämpfung darstellen. Die sog. Abklingkonstante  $\delta = \omega_0 \cdot D$  ist ein Produkt aus der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  und dem Dämpfungsgrad  $D$  und kann durch mathematische Anpassung (z. B. Regressionsanalyse) aus der vorliegenden Zeitreihe ermittelt werden.

Bedingt durch die Anwendung von Beschleunigungssensoren im laufenden Betrieb, d. h. ohne speziellen Ausschwingversuch /Resnik & Sargsyan 2014/, liegt der zentrale Innovationsaspekt der Datenauswertung nach diesem Prinzip in der Entwicklung eines stabilen Auswertalgorithmus zur Berechnung der zuverlässigen Dämpfungsparameter aus den gemessenen Beschleunigungszeitreihen. Ein Beispiel dieser Art stellt die sog. Random Decrement Technique (RDT) dar /Resnik & Kölling 2015/. Dieses mathematische Verfahren wurde erstmals in den 1960er-Jahren vorgeschlagen /Cole 1968/ und später im Zuge mehrerer wissenschaftlicher Untersuchungen

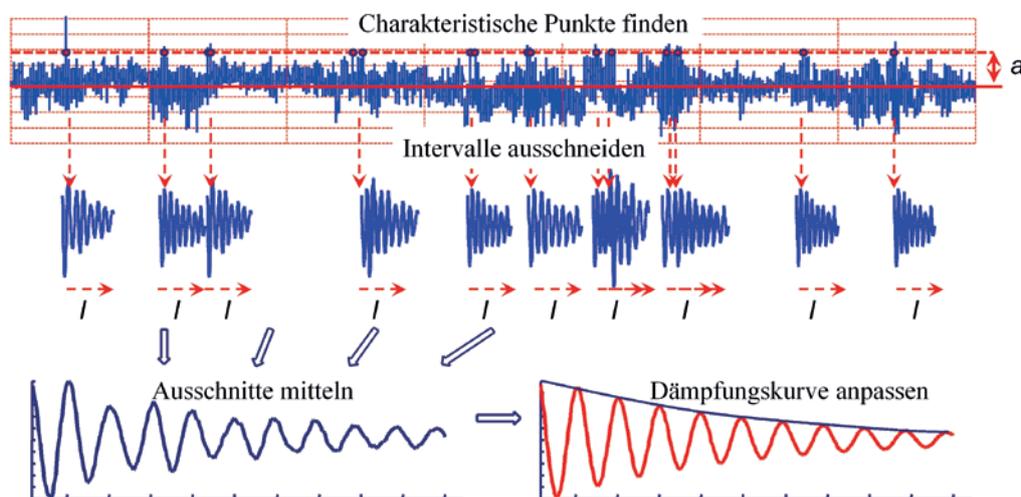


Abb. 4 | RDT-Auswertung zum Ermitteln von Dämpfungsparametern

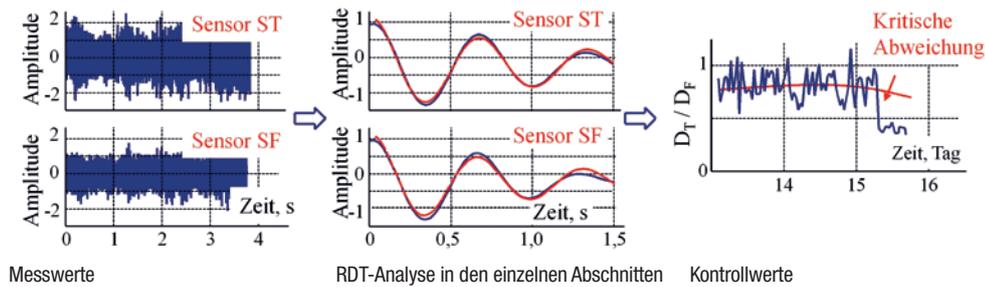


Abb. 5 | RDT-Konzept der CMS-Überwachung von Fundamenten

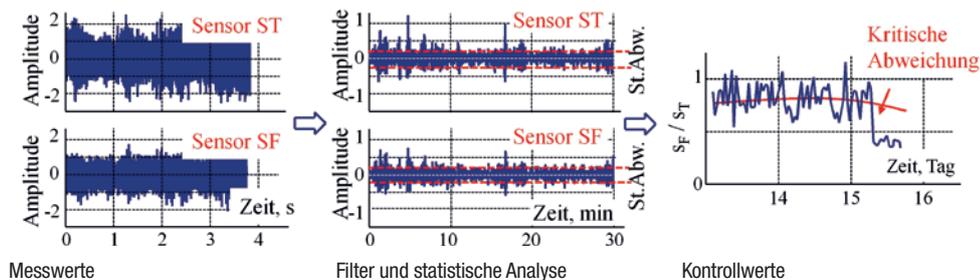


Abb. 6 | Konzept der statistischen Analyse der CMS-Überwachung von Fundamenten

weiterentwickelt (z.B. /Rodrigues & Brincker 2005/. Das Prinzip dieses Verfahrens ist es, eine große Anzahl kleiner Zeitausschnitte mit einer konstanten Länge aus einer gegebenen Zeitreihe zu extrahieren und zu mitteln, sodass die zufälligen Signalanteile weitgehend verschwinden können und nur noch eine freie Schwingungsantwort im Signal enthalten bleibt (Abb. 4). Zur Vereinfachung der Berechnung werden diese Abschnitte jeweils nach Erreichen eines konstanten Schwellenwerts  $a$  aus der Messreihe ausgeschnitten, welcher als Vielfaches (z.B. Zweifaches) der Standardabweichung des Signals angegeben wird. Der zweite entscheidende Parameter beim Anwenden des RDT-Verfahrens ist die Länge der verwendeten Zeitausschnitte  $l$ . Für sie hat sich eine Länge zwischen dem 0,8- und 1,5-fachen der Länge eines Abklingvorgangs als vorteilhaft erwiesen, damit eine robuste Funktionsanpassung zur Dämpfungsbestimmung möglich ist. Da die Schwingungsantwort von den tragenden Konstruktionen mehrere Frequenzen enthält, ist es außerdem sehr ratsam, die Messdaten im Voraus einem Bandpassfilter in einem vordefinierten Frequenzbereich zu unterziehen.

Die oben beschriebene Berechnung wird für jeden neuen Abschnitt der Zeitreihe einer fixierten Länge (z.B. 30 min) wiederholt (Abb. 4). In jedem Abschnitt erfolgt eine iterative Anpassung einer exponentiellen Funktion (Gl. (1)) mit den folgenden Unbekannten: Anfangsauslenkung  $A_0$ , Phasenverschiebung  $\varphi_0$ , Eigenkreisfrequenz  $\omega_d$  sowie Abklingkonstante  $\delta$ . Physikalisch betrachtet kann die so ermittelte Dämpfung in einem Tragwerk aufgrund verschiedener Effekte entstehen. Während die Materialdämpfung im Fundament u. a. von der Rissbildung und einer entsprechenden Energiedissipation abhängig ist, ändert sich die sogenannte externe Dämpfung der Turm- und folglich Fundamentalschwingungen allein durch die Orientierung bzw. Einstellungen der Blätter erheblich und kann deswegen kaum modelliert werden. Aus diesen Gründen werden auch bei diesem Parameter nicht die absoluten Werte, sondern das Verhältnis der Daten von unterschiedlichen Sensoren interpretiert. Bei der Datenauswertung im Rahmen eines CMS wird folglich geprüft, ob das aktuelle Verhältnis von Dämpfungsparametern

## Kassel documenta Stadt

Stadt Kassel  
Personal- und Organisationsamt  
34112 Kassel

Die in der Mitte Deutschlands gelegene Stadt Kassel mit ihren rund 200.000 Einwohnerinnen und Einwohnern gehört zu den landesweit wirtschaftlich dynamischsten Städten. Mit ihren attraktiven Sport-, Freizeit- und Kulturangeboten, dem Weltkulturerbe Bergpark Wilhelmshöhe und der landschaftlich reizvollen Lage im hessischen Bergland bietet Kassel eine hohe Lebensqualität.

Zur weiteren erfolgreichen Entwicklung unserer Stadt suchen wir zum nächstmöglichen Zeitpunkt

### eine Leiterin / einen Leiter für das Amt Vermessung und Geoinformation

im Dezernat Verkehr, Umwelt, Stadtentwicklung und Bauen.

Das Amt Vermessung und Geoinformation ist für das Geodatenmanagement der Stadt Kassel zuständig und unterstützt Stadtverwaltung, Wirtschaft, Bürgerinnen und Bürger mit aktuellen Geodaten und vielfältigen Dienstleistungen.

Die vollständige Ausschreibung finden Sie auf unserer Internetseite [www.stadt-kassel.de](http://www.stadt-kassel.de) unter der Rubrik „Aktuelles“ bei den Stellenangeboten.

Sofern Sie keinen Zugriff auf das Internet haben, können Sie den vollständigen Ausschreibungstext unter der Telefonnummer 0561 787 2098 anfordern.

**Bewerbungsschluss: 3. März 2017**

(Dämpfungsgrad  $D$ ) für die entsprechenden Sensoren (hier exemplarisch Sensor ST und Sensor SF) in etwa konstant bleibt oder sich ungünstig ändert.

### 2.3 Konzept auf der Basis der statistischen Analyse

Da die Beobachtungen hier mit Low-Cost-MEMS-Sensoren durchgeführt werden und die Schwingungsamplituden des Fundaments auch bei starkem Wind relativ klein sind, wird auf eine Erfassung von extremen Ereignissen wie die Einwirkung von einzelnen, relativ seltenen Windböen, so wie es etwa bei einem Notstopp der Anlage üblich ist, verzichtet. Stattdessen werden die zahlreichen ambienten Schwingungen nach dem Prinzip „Redundanz statt Intelligenz“ an unterschiedlichen Kontrollpunkten gemessen und in Intervalle der gleichen Größe zusammengefasst. Um Informationen über den Zustand des untersuchten Objekts aus Merkmalswerten einer Stichprobe (hier Beschleunigungsänderungen an bestimmten Messpunkten) zu gewinnen, können die üblichen statistischen Parameter (Streuung um den Mittelwert bzw. die entsprechenden empirischen Standardabweichungen  $s$ ) berechnet werden (Abb. 6). Um vergleichbare Ergebnisse in bestimmten spektralen Bereichen der Messdaten zu erhalten, ist auch bei diesem Verfahren ein Bandpassfilter einzusetzen.

In der Regel wird man ein Messkonzept so entwerfen, dass die Genauigkeit ausreichend ist, um die zu erwartenden Deformationen zu bestimmen. Insbesondere im hochpräzisen Messbereich, wie im behandelten Beispiel, liegen die kontrollierten Deformationen jedoch oftmals im Bereich der Signifikanzschwelle des verwendeten Messverfahrens, d. h. die eigentlich gesuchten Differenzen von realen Beschleunigungen an unterschiedlichen Messpunkten sind kaum größer als das unvermeidbare Messrauschen. Für die verwendete Methodik bedeutet diese Tatsache, dass in dem hier vorgestellten Verfahren unbedingt eine Schranke von etwa dem dreifachen Eigenrauschen des verwendeten Messsystems berücksichtigt werden muss. Nur in diesem Fall wird das Verhältnis der berechneten Standardabweichungen an unterschiedlichen Messpunkten berechnet und gespeichert.

Das Niveau des Eigenrauschens bestimmt maßgeblich die untere Auflösungsgrenze eines Sensors und ist oftmals frequenzabhängig /Resnik & Gerstenberg 2013/. Bei der Anwendung von kommerziellen Sensoren, die speziell für die präzisen Messungen konzipiert wurden, kann dieses Niveau aus den Kalibrierzertifikaten entnommen werden. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass die Kalibrierung unter Labor- und optimalen Ankoppelbedingungen durchgeführt wird. In der Praxis können gewisse Parameter (z. B. das Rauschverhalten) von den im Labor ermittelten Parametern abweichen, da die Ankoppelbedingungen oft schlechter sind. Es ist außerdem bekannt, dass in den ersten Jahren nach Herstellung der Sensoren ein Absinken der Empfindlichkeit (Alterungsprozess) zu erwarten ist. Eine Abschätzung des tatsächlichen Rauschverhaltens für die oftmals verwendeten preiswerten MEMS-Massenmarktsensoren muss in der Regel mit den speziellen Tests in Eigenregie realisiert werden. Dabei können ein oder auch mehrere Sensoren in der geplanten Konfiguration in einer möglichst ruhigen Umgebung, z. B.

auf einem tiefgeründeten Pfeiler weit entfernt vom Straßenverkehr und/oder Maschinen, aufgestellt werden.

### 3 VERGLEICH DER ENTWICKELTEN KONZEPTE ANHAND VON TESTMESSUNGEN

Alle drei genannten Verfahren der Datenanalyse weisen hinsichtlich der möglichen Automatisierbarkeit ein sehr großes Potenzial auf. Als Ergebnis erhält man jeweils die Verhältnisse von „mittleren“ Schwingungsamplituden bzw. Dämpfungskoeffizienten in unterschiedlichen Zeitintervallen, die zusätzlich noch über mehrere Tage gefiltert und erst dann im Sinne der Kategorien „gut“ und „sicherheitskritisch“ klassifiziert werden können.

Um eine optimale Lösung für eine frühzeitige Erkennung von sicherheitsrelevanten Defekten an WEA-Fundamenten auswählen zu können, bedarf es umfangreicher Testmessungen an den typischen Windenergieanlagen. Da die Beschreibung von allen Mess- und Auswertungsergebnissen der letzten Jahre den Umfang des Beitrags übersteigen würde, soll hier nur ein Beispiel dieser Art ausführlich behandelt werden.

Die beschriebenen Testmessungen wurden parallel an zwei 2-MW-Windenergieanlagen eines Windparks vom gleichen Typ und Baujahr realisiert. Diese Anlagen wurden so ausgewählt, dass die Zustände ihrer Fundamente deutlich unterschiedlich waren. Bei der ersten Anlage wurde vor einigen Jahren eine komplette Sanierung des Fundaments vorgenommen. Eine weitere typische Anlage, die später mit der Nummer zwei bezeichnet wird, wurde seit dem Erstellen vor etwa 13 Jahren nicht gründlich saniert und weist mehrere gut sichtbare ringförmige Risse im Fundament auf. Aus den mehrwöchigen Messergebnissen an den beiden Anlagen werden hier exemplarisch nur 57 Intervalle von jeweils 30 Minuten (insg. etwas mehr als ein Tag) präsentiert, da in diesem Zeitintervall besonders gute und stabile Windverhältnisse bis zu 8 m/s in 100 m Höhe herrschten. Um besonders aussagekräftige Ergebnisse bei den wechselnden meteorologischen Bedingungen erhalten zu können, wurden bei jeder Anlage zwei Sensorpaare (SF und ST in Abb. 2) orthogonal zur Turmachse positioniert. Das heißt, bei den Testmessungen wurden insgesamt acht synchronisierte Sensoren verwendet, die folgend fortlaufend nummeriert werden. Da in die weitere Auswertung das Verhältnis von unterschiedlichen Parametern einfließen muss, wurde bei allen Sensoren paarweise die gleiche Orientierung der sensitiven Achsen vorgenommen.

Abb. 7 stellt exemplarisch einen typischen Verlauf der festgestellten vertikalen dynamischen Deformationen bei beiden Anlagen dar. Für einen schnellen Überblick über die Änderungen der Frequenz-Amplituden-Charakteristik des jeweiligen Signals sind dafür die sogenannten Trendkarten besonders gut geeignet /Wenzel 2009/. In Abb. 7 werden mehrere Signale im Frequenzbereich gleichzeitig und in Abhängigkeit von ihren Zeitpunkten dargestellt, wobei aus Gründen der Anschaulichkeit eine zweidimensionale Flächendarstellung gewählt wurde. Die Ergebnisse (Frequenzspektren) mehrerer Messungen werden in dieser Darstellung zusammengeschieben und von oben betrachtet. Um die einzelnen Frequenzspitzen unterscheiden zu können, wurde eine variable Färbung in Abhängigkeit von den festgestellten Amplituden gewählt.

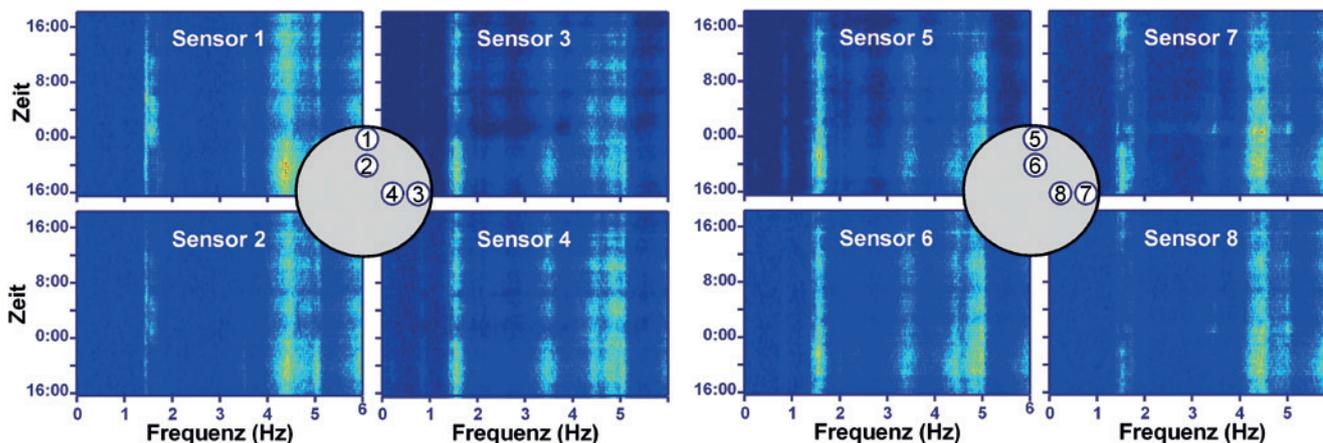


Abb. 7 | Ergebnisse der Schwingungsmessungen (exemplarisch)

Bekanntermaßen werden Bauwerke nur geringfügig zu erzwungenen Schwingungen angeregt, solange sich die Frequenzen von der Eigenfrequenz deutlich unterscheiden /Resnik 2009/. Die Messungen unter Last (hier wegen einer Anregung durch Wind und Betrieb) zeigen auch im behandelten Beispiel eine eindeutige dynamische Charakteristik des Tragwerks mit mehreren Eigenfrequenzen, die sich in den entsprechenden vertikalen hellen Linien in den präsentierten Trendkarten zeigen. So ist z. B. exemplarisch für alle Sensoren eine charakteristische Frequenz von etwa 1,5 Hz im Verlauf des gesamten Zeitintervalls deutlich erkennbar. Für eine Analyse und Bewertung solcher empirisch ermittelter Modalparameter bei Überwachungsmessungen sind die sog. FEM-Simulationen /Wenzel 2009/ von großem Nutzen. Sie erlauben, auch komplexe Bauwerke mithilfe von spezieller Software in einfache Bestandteile (Finite Elemente, FE) zu zerlegen und das Gesamtmodell (FEM) einer dynamischen Analyse zu unterziehen. Die Bewertung des ermittelten empirischen Frequenzbilds (Abb. 7) soll hier jedoch nicht näher behandelt werden, da diese für die drei präsentierten Konzepte von untergeordneter Bedeutung ist.

### 3.1 Auswertung auf der Basis von FFT-Analysen

Bei der Anwendung des oben beschriebenen FFT-Konzepts muss bei einer Voranalyse ein kleiner Frequenzbereich des Signalspektrums um eine entsprechende Eigenfrequenz herum ausgewählt werden. Bei dieser Auswahl sollte vermieden werden, dass sich mehrere, nahe beieinander liegende Eigenfrequenzen im Ausschnitt befinden. Beim behandelten Beispiel wurde deswegen exemplarisch ein Intervall zwischen 1 Hz und 2 Hz mit einer Eigenfrequenz von etwa 1,5 Hz (Abb. 7) ausgewählt und auf das Maximum in allen Datenabschnitten empirisch untersucht. Außerdem wurde eine Schranke von einem etwa dreifachen Rauschen der verwendeten Sensoren eingesetzt, da es andernfalls, z. B. beim Stillstand der Anlage, zu verfälschten Verhältnissen etwa beim Wert 1 kommen würde.

Die erheblichen Änderungen der Schwingungsamplituden bei allen Sensoren können mit den variierenden Windverhältnissen erklärt werden. Die Korrelationskoeffizienten der Messdaten von



TECHNIK  
HOCHSCHULE MAINZ  
UNIVERSITY OF  
APPLIED SCIENCES

An der Hochschule Mainz ist im Fachbereich Technik, Fachrichtung Geoinformatik und Vermessung, zum nächstmöglichen Zeitpunkt folgende Planstelle zu besetzen:

#### Professur (W2 LBesG) „Geodäsie / Geovisualisierung“

Die Stelleninhaberin oder der Stelleninhaber hat das Fachgebiet Vermessung in Lehre, anwendungsnaher Forschung und Entwicklung sowie Weiterbildung unter dem Aspekt Geovisualisierung zu vertreten. Das Lehrgebiet umfasst die messtechnischen Grundlagen der Vermessung mit verschiedenen geodätischen Sensoren zur Erzeugung von Standardprodukten. Wir suchen eine Persönlichkeit mit fundiertem Wissen und praktischen Erfahrungen in der angewandten Geodäsie.

Die Bewerberin bzw. der Bewerber soll eine wissenschaftliche Hochschulausbildung im Bereich Geodäsie, Geoinformatik oder einer verwandten Disziplin haben. Die Bereitschaft Lehrveranstaltungen in Grundlagenfächern und im berufsbegleitenden Masterstudiengang „Geoinformatik“ abzuhalten sowie auch samstags zu lehren wird vorausgesetzt. Eine substantielle Mitarbeit in der akademischen Selbstverwaltung ist erforderlich.

Eine Mitarbeit im Forschungsinstitut i3mainz ist erwünscht. Das i3mainz steht hierbei mit seiner Infrastruktur und einer Vielzahl von Kooperationspartnern zur Verfügung.

Die Einstellungsvoraussetzungen ergeben sich aus § 49 HochschulG. Der maßgebliche vollständige Ausschreibungstext ist verfügbar unter [stellenangebote.hs-mainz.de](http://stellenangebote.hs-mainz.de).



Bewerbungen sind bis zum 15.03.2017 zu richten an den Präsidenten der Hochschule Mainz, Herrn Prof. Dr. Muth: [bewerbungen@hs-mainz.de](mailto:bewerbungen@hs-mainz.de)

[stellenangebote.hs-mainz.de](http://stellenangebote.hs-mainz.de)



# Fokus auf Produktivität ...

den entsprechenden Sensorpaaren weisen jedoch Werte zwischen 0,86 und 0,88 auf und bestätigen somit die getroffene Annahme, dass ein Verhältnis der variablen Amplituden bei unterschiedlichen Bedingungen konstant bleibt (Abb. 8). Es ist außerdem festzustellen, dass das Verhältnis der Standardabweichungen der Amplituden der ersten sanierten Anlage etwas größer als bei der zweiten, nicht sanierten Anlage, ausfällt.

## 3.2 Auswertung auf der Basis von RDT-Analysen

Die zweite Möglichkeit der Datenauswertung von Schwingungsmessungen zum Erkennen von Defekten in den tragenden Konstruktionen besteht in der Berechnung und in der folgenden Interpretation von Dämpfungskoeffizienten bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen. Bei den durchgeführten Experimenten wurde die oben beschriebene RDT-Methodik für diese Zwecke eingesetzt und hat sich ebenfalls als ein passendes Verfahren erwiesen.

Die gewonnenen Ergebnisse für die beiden Anlagen sind in Abb. 9 dargestellt. Die festgestellten Änderungen der Dämpfung für alle Sensoren sind u. a. mit dem konstruktiven Anteil dieses Parameters verbunden, der sich z. B. in Abhängigkeit von der Richtung der Gondel und dem Pitchwinkel der Blätter ändert. Die ermittelten Parameter an allen vier Sensorpaaren weisen trotzdem eine sehr gute Übereinstimmung mit einem Korrelationskoeffizienten zwischen 0,7 und 0,8 auf. Diese Ergebnisse bestätigen somit die getroffene Annahme, dass auch die Dämpfungsparameter bei unterschiedlichen Bedingungen stabil bleiben und für eine CM-Kontrolle eingesetzt werden können. Die ermittelten Parameter für die zweite nicht sanierte Anlage fallen auch bei diesem Verfahren etwas kleiner als bei der ersten aus.

## 3.3 Auswertung auf der Basis der statistischen Analyse

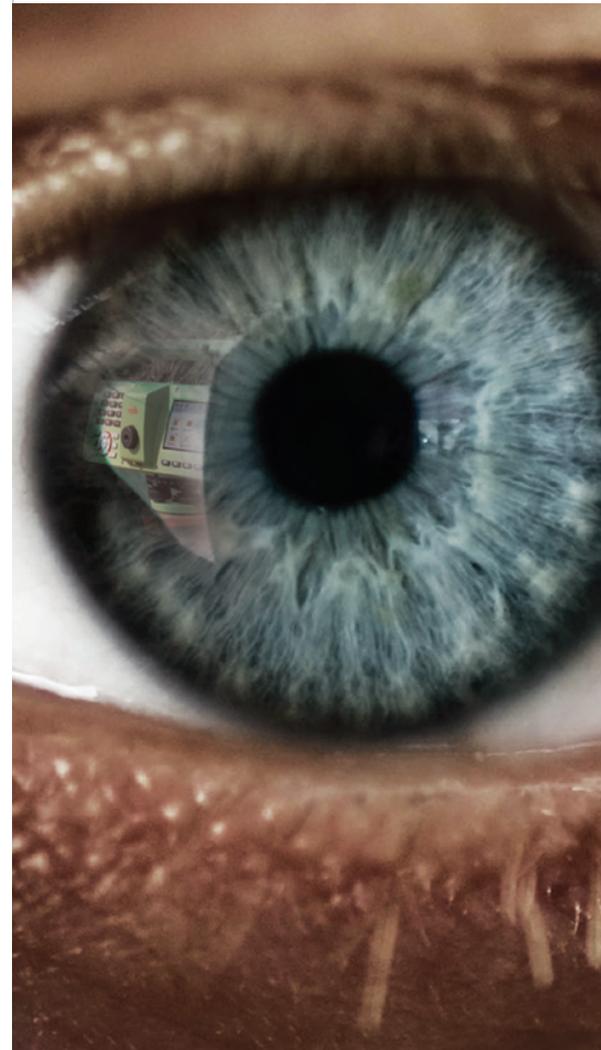
Bei dem dritten Konzept der Datenauswertung werden die ersten Gefahrenzeichen anhand statistischer Parameter von Schwingungsamplituden und zwar anhand der Verhältnisse der entsprechenden Standardabweichungen erkannt. Beim Anwenden dieses Verfahrens bei den beschriebenen Testmessungen an beiden Anlagen wurden die gewonnenen Zeitreihen im Voraus ebenfalls in Intervalle von 30 Minuten geteilt und dann mit einem Bandpassfilter zwischen 1 Hz und 2 Hz bearbeitet, um eine vergleichbare Datengrundlage zu den anderen beiden Verfahren zu gewährleisten.

Die Ergebnisse sind in Abb. 10 präsentiert. Zwischen den Kontrollparametern entsprechender Sensorpaare ergeben sich die mit Abstand größten Korrelationskoeffizienten zwischen 0,96 und 0,99, was praktisch ein funktionaler Zusammenhang zwischen diesen Werten bedeutet. Bei den präsentierten Ergebnissen ist außerdem eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der beiden anderen Verfahren erkennbar.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Interpretation der gewonnenen Kontrollwerte (Verhältnis von Amplituden bzw. Dämpfungsparametern bei unterschiedlichen Kontrollpunkten) ist bei allen präsentierten Verfahren ähnlich. Durch die vorhandenen Defekte verlieren die Schwingungen im Laufe der Ausbreitung im Fundament stets an Energie und folglich an Amplitude. Je größer diese Verluste sind, desto kleiner wird das ermittelte Verhältnis. Durch diese Effekte erhöhen sich auch die ermittelten Dämpfungsparameter der Schwingungen je nach Entfernung von der Quelle. Somit können diese Energieverluste, die durch das Verhältnis der entsprechenden Parameter kontrolliert werden, auch für die Beurteilung des Zustands von tragenden Konstruktionen eingesetzt werden. Selbstverständlich dienen die hier behandelten Verfahren nur für eine vorläufige Beurteilung, die dann mit anderen Verfahren und der Expertise von Fachleuten /Resnik 2015/ verifiziert werden

B. Resnik – Auswerteverfahren für eine frühzeitige Erkennung von sicherheitsrelevanten Defekten an tragenden Konstruktionen von Windenergieanlagen mit Beschleunigungssensoren – eine vergleichende Analyse



### ... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Dem Innovationsführer und Erfinder der Digitalnivelliere - Leica Geosystems - ist es gelungen, neue Digitalnivelliere zu entwickeln, die Ihren Arbeitsablauf deutlich beschleunigen.

Möglich wird dies durch das Zusammenspiel der neuen Autofokus Funktionalität, der neuen großen Farb-Touch Anzeige, der hochwertigen Weitwinkel-Kamera und dem neuen Digitalkompass.

Leica Geosystems  
Tel. 089/14 98 10 0  
<http://facts.leica-geosystems.com/LS>

**Leica**  
Geosystems

Kontrollparameter	Anlage 1				Anlage 2			
	Sens. 1 und 2		Sens. 3 und 4		Sens. 5 und 6		Sens. 7 und 8	
	Verh.	±	Verh.	±	Verh.	±	Verh.	±
FFT, Amplitude	0,70	0,08	0,74	0,08	0,60	0,06	0,66	0,09
RDT, Dämpfung	0,73	0,08	0,81	0,16	0,66	0,13	0,58	0,09
Standardabweichung, Amplitude	0,75	0,05	0,77	0,07	0,65	0,03	0,76	0,05

Tab. 1 | Ergebnisse der Datenauswertung nach den unterschiedlichen Verfahren

müssen. Für eine umfassende Analyse und eindeutige Beurteilung des Zustands der untersuchten Bauwerke bedarf es wesentlich längerer Schwingungsmessungen unter unterschiedlichen meteorologischen und betrieblichen Bedingungen (z. B. Windrichtung und Orientierung der Gondel), die in diesem Beitrag nicht näher behandelt werden.

Die Ergebnisse der Datenauswertung mit den drei präsentierten Verfahren sind in Tab. 1 zusammengestellt und können zur Auswahl einer optimalen Lösung dienen. In dieser Tabelle werden für beide Anlagen und alle vier hier verwendeten Sensorpaare die mittleren Kontrollparameter (Verhältnis von Amplituden nach der FFT-Analyse, Verhältnis von Dämpfungsparametern nach der RDT-Analyse, Verhältnis von Standardabweichungen nach der statistischen Analyse) aufgelistet. Für jeden ermittelten Parameter steht ebenfalls seine Streuung auf der Basis von 57 verwendeten Intervallen von jeweils 30 Minuten zur Verfügung.

Alle drei präsentierten Verfahren der Datenauswertung weisen sowohl in der Zuverlässigkeit als auch hinsichtlich der möglichen Automatisierbarkeit ein sehr großes Potenzial auf. Der größte Vorteil dieser Vorgehensweise bei allen drei Verfahren besteht außerdem darin, dass die erfassten Informationen im Laufe von mehreren Jahren systematisch erfasst und dann je nach Bedarf gemeinsam analysiert werden können. Alle ermittelten Werte weisen unter Berücksichtigung der vorliegenden Standardabweichungen keine signifikanten Unterschiede auf und passen sehr gut zueinander. Diese Tatsache bestätigt auch eine hohe Qualität der realisierten Auswertungen. Im Bereich der Zuverlässigkeit sind jedoch Vorteile bei den ermittelten Amplitudenverhältnissen im Vergleich zu den Dämpfungsverhältnissen zu erkennen. In erster Linie sind die relativ großen Streuungen von den ermittelten Dämpfungen bei gleichen Bedienungen mit den eingebauten mathematischen Algorithmen zu erklären. Die kleinsten Streuungen weisen die Ergebnisse der statistischen Analyse der gefilterten Messwerte auf, die in der letzten Zeile der Tabelle präsentiert werden. Offensichtlich kann nach dem heutigen Stand der Untersuchungen besonders dieses Verfahren für die weitere Nutzung bei den CM-Systemen von Windenergieanlagen sowohl bei den Fundamenten als auch bei den Flachverbindungen empfohlen werden.

## LITERATUR

- Cole, H. A. (1968): On-Line-Analysis of Random Vibrations. AIAA Paper, 68–288.
- Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Petersen, C. (2000): Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg, Braunschweig.

Resnik, B. (2009): Analyse von hochfrequenten geodätischen Deformationsmessungen mit gefensterter Fourier-Transformation. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)2, 70–74.

Resnik, B. (2014): Kontrolle der Türme von Windenergieanlagen im Rahmen von periodischen Untersuchungen. In: FORUM – Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure, (2014)1, 4–13.

Resnik, B. (2015): Messtechnische Erkennung von sicherheitsrelevanten Defekten an WEA-Fundamenten im Rahmen von Condition-Monitoring-Systemen. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 122(2015)11-12, 351–358.

Resnik, B.; Gerstenberg, J. (2013): Qualitätssicherung bei der Anwendung von preiswerten MEMS-Sensoren für geodätische Zwecke – Ansätze und Erfahrungen. In: Neumann, I. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswertverfahren. Wißner, Augsburg. 171–186.

Resnik, B.; Kölling, M. (2015): Anwendung der Random Decrement Technique (RDT) beim Monitoring von Bauwerken. In: Hanke, K.; Weinold, T. (Hrsg.): 18. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2015. Wichmann, Berlin/Offenbach, 224–229.

Resnik, B.; Sargsyan, A. (2014): Dynamische Belastungstests von tragenden Konstruktionen mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 121(2014)4, 20–27.

Resnik, B.; Schiefelbein, N. (2013): Frühzeitige Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenteinbauteilen von Windenergieanlagen – Ansätze und Erfahrungen. In: Hanke, K.; Weinold, T. (Hrsg.): 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2013. Wichmann, Berlin/Offenbach, 183–192.

Resnik, B.; Schiefelbein, N. (2014): Kontrolle der Schiefstellung von Windenergieanlagen im Rahmen von periodischen Untersuchungen: Ansätze und Erfahrungen. Sonderheft „Messtechnik im Bauwesen“, Ernst & Sohn, Berlin, 16–21.

Rodrigues, J.; Brincker, R. (2005): Application of the Random Decrement Technique in operational modal analysis. LNEC – National Laboratory for Civil Engineering, Portugal.

Wenzel, H. (2009): Health Monitoring of Bridges. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Prof. Dr.-Ing. Boris Resnik

BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN  
FACHBEREICH BAUINGENIEUR- UND  
GEOINFORMATIONSWESEN

Luxemburger Strasse 10 | 13353 Berlin  
resnik@beuth-hochschule.de

