

Zustandsüberwachung an kritischen Komponenten von Offshore- Windenergieanlagen

Kilian TSCHÖKE¹, Bianca WEIHNACHT¹, Eberhard SCHULZE¹,
Bernd FRANKENSTEIN¹, Lars SCHUBERT¹

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Institutsteil
Materialdiagnostik (IKTS-MD), Dresden

Kurzfassung. Offshore-Bauwerke sind hohen dynamischen Wechselbelastungen ausgesetzt, die infolge von Wind, Wellen und Bauteilschwingungen aufgrund der Rotordynamik auftreten. Im Schadensfall sind die Windenergieanlagen (WEA) aufgrund aktueller Wettersituationen möglicherweise nicht erreichbar. Damit fällt eine Anlage im ungünstigsten Fall für längere Zeit aus. SHM-Methoden helfen hier, frühzeitig Schäden an Rotorblättern, Antriebsstrang, Getriebe und den Gründungsstrukturen zu erkennen.

In Faserverbundstrukturen, wie sie für Rotorblätter von WEA eingesetzt werden, können aktive und passive akustische SHM-Verfahren zur Schadensanalyse genutzt werden, die auf geführten Wellen basieren und somit Sonderformen der Ultraschallmessung zugeordnet werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer IKTS-MD ist die Überwachung von verschiedenen Gründungsstrukturen wie Monopiles und Jackets. Den Übergang zum aufgesetzten Transition-Piece bilden über eine Länge von bis zu 8 m Stahl-Beton-Stahl-Fügeverbindungen, die sogenannten Grout-Verbindungen, welche durch die Windlasten hohen Wechselbelastungen ausgesetzt sind. Im Fehlerfall können Ausbröckelungen entstehen, die diese Fügeverbindung in ihrer Qualität herabsetzen und Setzungen des Turms verursachen. Derartige Verbindungen können mit aktiv angeregtem Ultraschall überprüft werden. Mithilfe bildgebender Verfahren, z.B. der Synthetic-Aperture-Focusing-Technique (SAFT), können Schädigungen auf dem Umfang der Grout-Verbindung lokalisiert werden.

Darüber hinaus kann das SAFT-Verfahren ebenfalls genutzt werden, um die Überwachung von Schweißnähten an den Türmen und Jackets zu realisieren. Das zur Überwachung der untermeerischen Gründungsstruktur notwendige Monitoringsystem besteht hierbei aus einer permanent installierten Manschette mit fest integrierten Sensoren.

Neben dem Überblick über die umfassende Überwachung einer WEA liegt der Schwerpunkt dieser Präsentation auf der Überwachung von Grout-Verbindungen und den damit verbundenen neuesten technologischen Entwicklungen.

Einführung

Ein Kernproblem der heutigen Zeit stellt die stetig steigende Energiebedarfsdeckung der Bevölkerung bei gleichzeitigem Rückgang der natürlichen Rohstoffe dar. Innerhalb der verschiedenen regenerativen Energiegewinnungsformen besitzt derzeit die Windkraft mit kontinuierlicher Zunahme quantitativ den höchsten Anteil. Ein Schwerpunkt des Ausbaus von Windenergieanlagen (kurz WEA) wird durch die stabilen Windverhältnisse und den damit einhergehenden höheren Energiebeiträgen der Offshore-Bereich sein. Dennoch stehen Windpark-Betreiber auch nach über 30 Jahren Forschung vor aktuellen technischen Problemen und Herausforderungen, die es insbesondere im Offshore-Bereich zu lösen gilt.

Vor allem durch den Aufbau von Leistungsklassen von 5 MW und höher steigen die Anforderungen an WEA hinsichtlich Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit, Wartungsarmut und Lebensdauer permanent. Für Offshore-WEA trifft das am deutlichsten zu. Hier sind Ausfälle, Überwachung und Reparaturen mit besonders großem Aufwand verbunden. Der Service ist zu einem erheblichen Teil des Jahres durch stürmische See gar nicht möglich und muss sich daher auf ein Minimum beschränken. Unter sicherheitsrelevanten Gesichtspunkten helfen Methoden der Zustandsüberwachung (engl. Structural Health Monitoring, kurz SHM) dabei, frühzeitig Schäden an Rotorblättern, Antriebsstrang, Getriebe und den Gründungsstrukturen zu erkennen. Diese Überwachungstechniken beugen schwerwiegenden Systemausfällen vor und erhöhen die Zuverlässigkeit der Energieversorgung. Der permanente Betrieb der Anlagen wird gesichert und somit auch deren Effizienz gesteigert.

1. Rotorblätter

Die äußeren Einwirkungen auf die Rotorblätter einer WEA, mechanischer Abrieb, klimatische Ereignisse und laufende Lastwechsel, führen im langjährigen Betrieb zu Verschleiß und Alterung. Ebenso können produktionsbedingte Fehlstellen und Konstruktionsfehler, die bereits während der Fertigung eines Rotorblattes entstehen oder eingebracht werden, den Betrieb einer WEA nachhaltig stören oder gar unmöglich machen. Je eher lokale Konzentrationen solcher Schädigungen oder Verschleißeffekte ermittelt werden können, umso besser sind die Reparaturmöglichkeiten oder die Chancen, Folgeschäden vorzubeugen bis hin zur Katastrophenvermeidung.

1.1 Inspektion während der Fertigung

Die Materialdiagnose eines Rotorblattes einer WEA ermöglicht das IKTS-MD mit der Entwicklung eines automatisierten Ultraschall-Scanwagens mit integrierter Messtechnik (PCUS® Pro) sowie abgestimmter Steuer- und Auswertesoftware (PCUS® Pro Lab). Sowohl während der Fertigung als auch während regelmäßigen Wartungsarbeiten kann der Scanwagen zum Einsatz kommen. Er ist in **Abbildung 1** dargestellt.

Dieser Scanwagen wurde speziell für die Überprüfung der Hauptbelastungszonen eines Rotorblattes, den aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK) bestehenden Gurten mit den Steganbindungen, konzipiert. Durch mäanderförmige Scanfahrten im Impuls-Echo-Verfahren können fertigungsbedingte Fehler, wie Risse, Trockenstellen, Lufteinschlüsse, Undulationen und die sich daraus entwickelnden Delaminationen, vollautomatisiert detektiert und beschrieben werden. Ein B-Scan einer solchen Scanfahrt über einem GfK-Gurtbereich eines Rotorblattes ist in **Abbildung 1** enthalten.

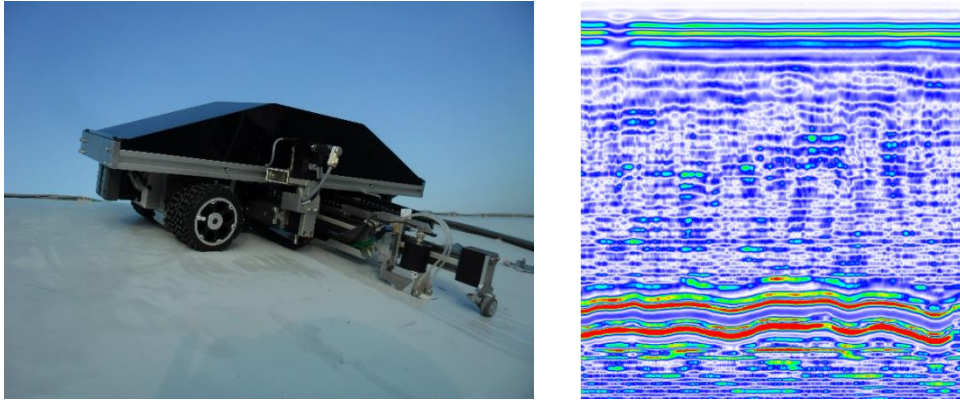


Abbildung 1. Links: Scanwagen auf der Oberfläche eines Rotorblatts. Rechts: Tiefengestrecktes B-Bild einer Ultraschallschallfahrt über einem GfK-Gurtbereich.

1.2 Monitoring im Betrieb

Die Überwachung und Diagnose eines Rotorblattes im Betrieb sind insbesondere für Offshore-WEA unabdingbar und gestatten eine zustandsabhängige Instandhaltung und die Bewertung der weiteren Zuverlässigkeit der Bauteile. Ein integriertes Messsystem ist hierfür ein sehr geeignetes Mittel.

Zur Schadensdetektion verwendet das Fraunhofer IKTS-MD eine Methodenkombination akustischer Verfahren. Das kombinierte Messprinzip beinhaltet dabei das aktive Verfahren Acousto Ultrasonics (AU) und das passive Verfahren Acoustic Emission Testing (AE). Zur Strukturüberprüfung werden Ultraschallwellen genutzt, die von piezoelektrischen Wandlern angeregt und/oder detektiert werden. Dabei bilden die triangulierten AE-Ereignisse den aktuellen Schädigungsprozess ab. Der Umfang einer Schädigung dokumentiert sich in den AU-Signalen. Der Ortungsplot einer AE-Messung an einem Rotorblatt wird in **Abbildung 2** gezeigt. Die Genauigkeit der Lokalisierung liegt dabei im cm-Bereich. Weitere Einzelheiten und Ausführungen zu den o.g. Verfahren und der Versuchsdurchführung, die den Ergebnissen in **Abbildung 2** zugrunde liegen, sind [1] zu entnehmen.

Für den Einsatz des Verfahrens auf einer WEA dürfen wegen der Blitzschutzproblematik keine metallischen Leiter in das Rotorblatt eingebracht werden. Aus diesem Grund wird die Energie- und Datenübertragung durch optische Leiterbahnen realisiert.

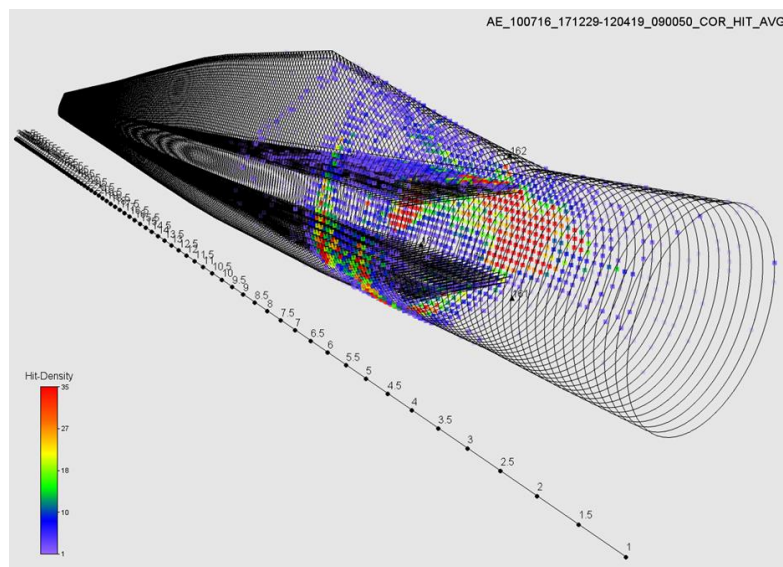


Abbildung 2. Ortungsplot einer akustischen Schallemissionsprüfung an einem Rotorblatt.

2. Antriebsstrang und Getriebe

Methoden und Messsysteme der Zustandsüberwachung sichern neben der Zuverlässigkeit auch die optimale Funktionsweise kritischer Komponenten und Anlagen, wie z.B. des Antriebsstranges und des Getriebes einer WEA. Weiterhin wirken derartige Systeme unterstützend bei der Konzeption, Errichtung und Inbetriebnahme der Anlagen. Die 3D-Laservibrometrie kann hierbei bereits während der Konzeption der Messsysteme einen entscheidenden Beitrag leisten. Eine spezifische Erfassung und Analyse von Schwingungen in allen drei Raumdimensionen ermöglicht eine gezielte und konstruktive Anpassung der Funktionsweise der Anlagen. Neben Betriebsschwingungen und Eigenmoden können darüber hinaus dreidimensionale Dehnungen erfasst und visualisiert werden. Die Schwingungsanalyse eines Triebstranges einer Windturbine ist in **Abbildung 3** dargestellt.

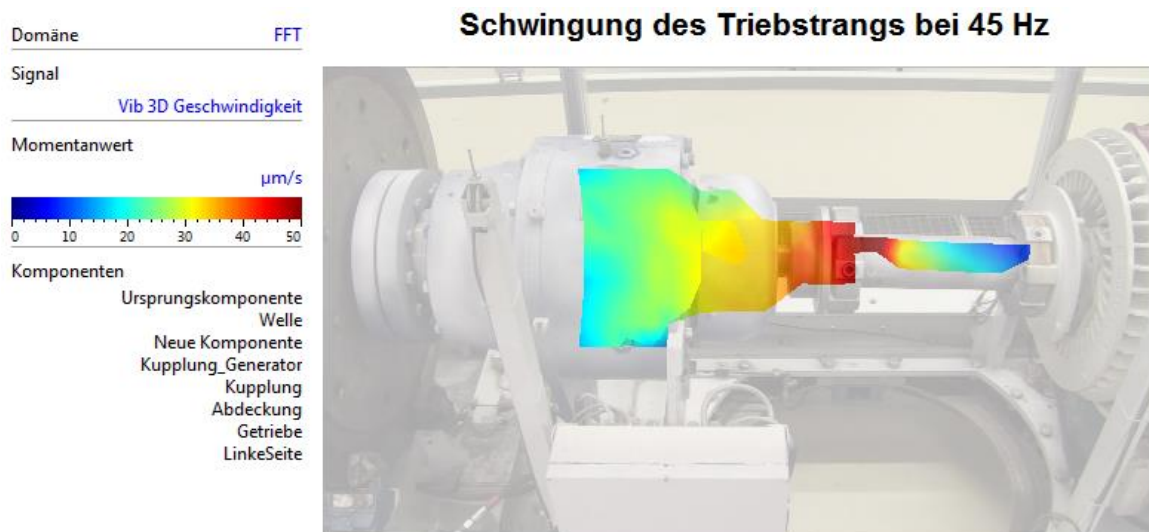


Abbildung 3. Schwingungsanalyse eines Triebstranges einer Windturbine. Dargestellt ist die Schallschnelle, gemessen mittels 3D-Laservibrometrie.

Da Antriebsstrang und Getriebe oft sehr schwer zugängliche Anlagenteile sind, ist die Installation eines autarken Überwachungssystems für ein Monitoring im Betrieb zu realisieren. Mit Hilfe eines am Fraunhofer IKTS-MD entwickelten Funkmoduls ist die kabellose Kommunikation zwischen einzelnen Sensoren und einer Auswerteeinheit möglich. Das System ist mit Beschleunigungssensoren in der Lage, niederfrequente Eingangsgrößen wie Bauteilschwingungen zu erfassen und zu übertragen. Mit Sensoren auf Piezobasis ist die Verarbeitung von hochfrequenten Messgrößen, wie akustischen Signalen für Schallemissionsmessungen, aber auch die aktive Signaturanalyse möglich. Zudem können durch das System Umgebungskennwerte, wie z.B. die Temperatur, erfasst werden.

3. Gründungsstruktur

Für Offshore-WEA kommen unterschiedlichste Gründungsstrukturen zum Einsatz, um die Anlage im oder am Meeresgrund zu verankern. Die am häufigsten eingesetzten Gründungen sind hierbei Monopile- und Jacket-Konstruktionen. Ein Monopile besteht aus einem runden Stahlpfahl, der in den Meeresboden gerammt wird. Auf dem aus der Wasseroberfläche herausragenden oberen Ende des Pfahls wird die WEA montiert. Jackets sind geschweißte Stahlrohrkonstruktionen, deren oberes Ende ebenfalls aus dem Meer herausragt. Das Jacket selbst wird mit Pfählen ober über Ketten am Meeresboden verankert.

3.1 Monopiles und Grout-Verbindung

Den o.g. Übergang zwischen Monopile und aufgesetzter WEA bildet, über eine Länge von bis zu 8 m eine Stahl-Beton-Stahl-Fügeverbindung, die sogenannte Grout-Verbindung. Diese ist durch die Windlasten hohen Wechselbelastungen ausgesetzt. Im Fehlerfall können Ausbröckelungen entstehen, die diese Fügeverbindung in ihrer Qualität herabsetzen und Setzungen des Turms verursachen. Ebenso ist das Aushärten der eingebrachten Betonmasse während der Installation der WEA nicht ohne weiteres zu überwachen. Beiden Problemstellungen kann mit aktiv angeregtem Ultraschall begegnet werden.

Ultraschallverfahren, die auf geführten Wellen beruhen, und die zur Überwachung der Grout-Verbindungen eingesetzt werden sollen, müssen insbesondere an diese spezielle Prüfaufgabe angepasst werden. So sind sowohl das umgebende Wasser als auch der den Monopile umschließende Meeresboden Randbedingungen, die sich sehr stark dämpfend auf den Pegel des akustischen Signales auswirken. Aktoren und Sensoren, die eingesetzt werden sollen, müssen hinsichtlich dieses Einflusses ausgelegt werden. Dies geschieht simulationsgestützt.

In einem ersten Konzeptionsschritt wird das Resonanzverhalten eines Monopiles, ausgehend von Konstruktionszeichnungen, untersucht. Die Wandstärke und der Aufbau des Pfahles beeinflussen dessen Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen. Messsignale, deren Anregungsfrequenz im Bereich der Eigenfrequenzen des Monopiles liegen, sind zu vermeiden, da sie von unerwünschtem Rauschen überlagert werden. Enthält der Anregungsimpuls in seinem Frequenzspektrum anteilig die Resonanzfrequenz, so führt dies später zu unerwünschten Messeffekten. Auf der Grundlage dieser ersten Untersuchungen werden geeignete Sensoren, sowie ein geeigneter Quellimpuls ausgewählt.

Die Auslegung des Aktors geschieht in zwei Schritten. Der erste Schritt besteht aus der Ermittlung der notwendigen Sendeleistung. Hierfür ist insbesondere die Dämpfung des Signals im Monopile beim Durchlauf in Wasser und/oder im Meeresboden zu beachten. Die Signalausbreitung wird mit Hilfe eines selbstentwickelten Programmes simuliert. Die Grundlage bilden die Grundgleichungen der Elastodynamik, die Cauchy'sche Bewegungsgleichung und das Hookesche Gesetz. Dieses System partieller Differentialgleichungen wird mittels einer sog. Linienmethode (engl. methods of lines, kurz MOL) diskretisiert. Zunächst verwendet man eine Finite Volumen Methode auf versetzten Gittern, um die räumliche Diskretisierung zu realisieren. Als Zeitschrittverfahren wird ein sog. Leap-Frog-Verfahren verwendet. Dieses entspricht einem Finite Differenzen Verfahren zweiter Ordnung mit einem zentralen Differenzenstern. Weitere Ausführungen können [2] entnommen werden. Diese Methode bringt den Vorteil mit sich, dass sowohl der Monopile, als auch das umgebende Wasser und der Meeresboden in einem Modell berücksichtigt werden können. Ausgehend von einem optimalen Empfangspegel kann die Stärke des Anregungsimpulses dann unter der Berücksichtigung der Randbedingungen ermittelt werden. In einem zweiten Schritt der Aktorkonzeption wird die ermittelte notwendige Stärke des Quellimpulses genutzt, um den Aufbau des Aktors zu designen. In einem elektromechanischen Modell, das in ANSYS realisiert wird, werden der Aktor und dessen unmittelbare Umgebung simuliert. Ebenso werden die Kräfte, die sich durch die magnetische Anheftung des Aktors an den Monopile ergeben, in der Simulation berücksichtigt. Der Stapelaufbau der piezoelektrischen Wandler-elemente wird so angepasst, dass das Abstrahlungsverhalten des Aktors der notwendigen Sendeleistung entspricht.

Abbildung 4 zeigt einen am IKTS-MD gefertigten Aktor, der für Messungen an Monopiles und Grout-Verbindungen Verwendung findet. Das Simulationsmodell konnte anschließend mit Laservibrometrie-Messungen an einem Aktor im Labor validiert werden.



Abbildung 4. Gefertigter Aktor, der für Messungen an Monopiles und Grout-Verbindungen Verwendung findet.

Mit einem am Fraunhofer IKTS-MD gefertigtem Aktor, der speziell für die Überwachung von Grout-Verbindungen ausgelegt wurde, konnten bereits erste Testmessungen an einem Monopile durchgeführt werden. Hierbei wurden sowohl das Resonanzverhalten der Wandler als auch Reflexionen und Streuungen innerhalb des Monopiles untersucht. Darüber hinaus wurden bildgebende Monitoringverfahren an die Bedürfnisse der speziellen Prüfaufgabe angepasst. Migrationsverfahren, auch bekannt als SAFT-Verfahren (Synthetic-Aperture-Focusing-Technique), eignen sich hervorragend für die Visualisierung von Ausbröckelungen innerhalb der Grout-Verbindung. Theoretische Grundlagen wurden in [3] gelegt. Die technische Umsetzbarkeit konnte anhand von Simulationsdaten, die auf dem oben beschriebenen Verfahren beruhen, gezeigt werden.

3.2 Überwachung von Schweißnähten an Jacket-Konstruktionen (Sensormanschette)

Besonders die Gründungsstrukturen der WEA sind durch den Angriff von Wind und Wellen dynamisch hoch belastet, wodurch lokale Schweißnahtrisse entstehen können. Ausgewählte Schweißverbindungen werden regelmäßig von Industrietauchern auf Korrosion und Risse geprüft. Die effektive Arbeitszeit der Taucher unter Wasser ist jedoch stark eingeschränkt. Die Anwendbarkeit konventioneller Prüftechniken im Offshore-Bereich ist deshalb begrenzt, woraus die Notwendigkeit der Entwicklung geeigneter Monitoring Verfahren resultiert.

Für das akustische Monitoring rohrförmiger Gründungsstrukturen, wie sie bei sog. Jackets Verwendung finden, sind Manschettenkonzepte mit über den Umfang verteilten Sensoren geeignet. Die Offshore-Anwendung fordert eine hohe Seewasserbeständigkeit der Manschetten, die für permanente Überwachungsaufgaben über viele Jahre hinweg gewährleistet werden muss. Dazu ist es notwendig, Elektronik und Sensoren mit verschiedenen Barrierschichten zu schützen, die bei der entwickelten Manschette in drei Ebenen realisiert wird. Eine erste Schicht besteht aus einem diffusionsarmen Foliensystem und stellt die Außenverkapselung der Manschette dar. Eine weitere Barrierschicht bildet das thermoplastische Einbettungsmaterial. Neben der Schutzfunktion dient es auch zur Druckverteilung auf die Bauelemente. Eine dritte Sperre wird durch den Elektronikverguss gebildet. Die verwendeten Materialien wurden hinsichtlich Medienresistenz, mechanischer Stabilität, Haftungseigenschaften und elektrischer Isolation bewertet und aufeinander abgestimmt. Die Einbettung von Sensorelektronik und Piezokeramik erfolgt durch Laminieren. Das angewendete Temperatur-Zeit-Profil wurde speziell auf Elektronik und Piezokeramik angepasst. Der Laboraufbau einer gefertigten Sensormanschette ist in **Abbildung 5** zu sehen.

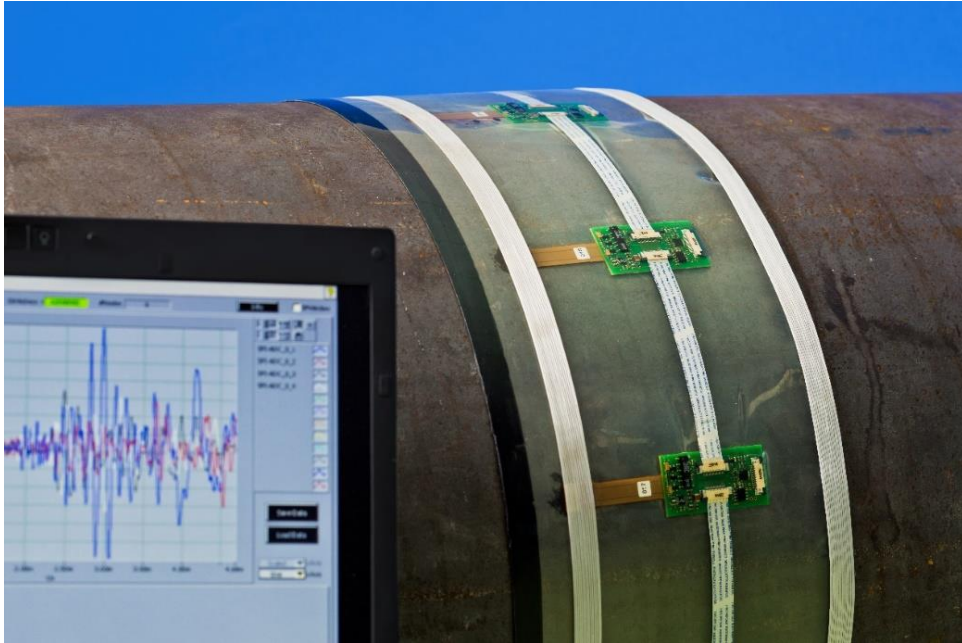


Abbildung 5. Laboraufbau einer Sensormanschette zur Überwachung von Jacket-Konstruktionen.

Die Datenauswertung erfolgt bildgebend durch eine Fresnelzonenmigration. Bei der Datenerfassung fungiert jedes Modul zeitweise als Aktor oder Sensor. Unter Einbeziehung zusätzlich aufgezeichneter Umweltdaten erfolgt eine Korrektur der Messsignale. Anschließend wird auf Grundlage von Simulationsdaten eine Übertragungsfunktion gebildet, die mit den Sensorsignalen gefaltet wird. Das Signal wird während der Faltung normiert und es bildet sich im Wesentlichen nur noch der $L(0,1)$ -Mode ab. Auf das gefaltete Signal wird eine Fresnel-Migration zur Bildgebung angewendet. Das erreichte Fehlerauflösungsvermögen der Manschette hängt dabei von der Anregungsfrequenz, dem Modulabstand und der Entfernung zum Schaden ab. Der Modulabstand ist dabei so optimiert, dass eine aliasingfreie Bildrekonstruktion über einen weiten Bereich des Rohrumfangs möglich ist. Weitere Informationen über das verwendete bildgebende Verfahren finden sich in [4].

4. Zusammenfassung

Mit den vorgestellten Verfahren und Techniken wurden die Möglichkeiten der Zustandsüberwachung von kritischen Komponenten einer Offshore-Windenergieanlage aufgezeigt. Diese umfassen die Überwachung der Rotorblätter während der Fertigung und im Betrieb, des Antriebsstranges während der Auslegung des Bauteiles und funküberwacht während des Betriebes, sowie der Gründungsstrukturen einer WEA. Insbesondere wurde auf Monitoringkonzepte für die sog. Grout-Verbindung eingegangen. Die Auslegung eines angepassten Messsystems, bestehend aus Aktoren und Sensoren, wurde beschrieben. Für die Überwachung von Jacket-Konstruktionen wurde die Umsetzung einer Sensormanschette für den Einsatz unter Wasser und die Überwachung von Schweißnähten präsentiert.

Die entwickelten Methoden nutzen teilweise simulationsbasierte Daten. Numerische Verfahren wurden speziell an die Problemstellungen angepasst und anschließend in Laborversuchen validiert. Bildgebende Verfahren wurden vorgestellt und deren Anwendung für die einzelnen Problemstellungen aufgezeigt.

Referenzen

- [1] **Schubert, Lars.** *Zustandsüberwachung an Faserverbundwerkstoffen mit geführten Wellen.* Dresden : TUDpress, 2012.
- [2] **Marklein, René.** *Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik.* Kassel : Shaker Verlag, 1997.
- [3] **Neubeck, Robert.** *Wellenmodenselektive Migrationsverfahren für Ultraschalldaten an Plattenstrukturen.* Freiberg : s.n., 2014.
- [4] **Gaul, Tobias.** *Anpassung des SAFT-Verfahrens zur Fehlererkennung an metallischen Offshore-Gründungsstrukturen mit geführten Wellen.* Dresden : s.n., 2013.