Geführte elastische Wellen für die Untersuchung von Unterwasserschweißnähten mittels kabelloser Manschettentechnologie und Unterwasserrobotik

Bianca WEIHNACHT [1], Tobias GAUL [1], Thomas KLESSE [1], Martin OEMUS [1], Johann WOLLSTADT [1], Robert NEUBECK [1], Sebastian SONNTAG [1], Lars SCHUBERT [1]

[1] Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden

Kontakt E-Mail: bianca.weihnacht@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die Zahl von Offshore-Windenergieanlagen nimmt kontinuierlich zu und leistet einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele. Besonders Gründungsstrukturen sind durch widrige und wechselhafte Umweltbedingungen hochbelastet, wodurch Schweißnahtrisse entstehen können. Konventionelle Prüftechniken sind im Offshore-Bereich nur begrenzt einsetzbar. Deshalb ist die Entwicklung geeigneter halb- und vollautonomer Zustandsüberwachungsverfahren wichtig. Grundsätzlich ist diese Technologie aber für alle Offshore-Bauwerke wie Brücken, Konverterplattformen und Pipelines geeignet.

Vorteil bei der Anwendung im Kontext von Unterwasserstrukturen ist die Möglichkeit mittels Unterwasserrobotik wie Remote Operated Vehicles (ROV) oder aber Autonomous Underwater Vehicles (AUV) zu inspizieren. Dafür wurde im Rahmen einer technologischen Adaption die gesamte Wertschöpfungskette von der Auslegung bis zum anwendungsbereiten Funktionsmuster durchlaufen. Die einzelnen Komponenten wurden mit Finite Elemente Simulationen ausgelegt und darauf basierend optimierte piezoelektrische Scherwellenwandler entwickelt. Für die Elektronik stand die Langlebigkeit und Zuverlässigkeit im Vordergrund. Eine dauerhaft schützende Laminierung von Elektronik und Sensorik ist die Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz unter Wasser über längere Zeiträume. Zum Auslesen der Daten wurde eine kabellose induktive Energieübertragung und Datenkommunikation erfolgreich umgesetzt.

Abschließend erfolgte ein Test im Hafenbecken in Rostock, wobei die ROV-tauglichkeit im Vordergrund stand. Das Einbringen eines künstlichen Fehlers in einen Rohrdemonstrator ermöglichte die Validierung des Verfahrens und dessen Eignung für die Fehlerdetektion an Schweißnähten unter Wasser.

Lizenz: https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de

Einführung

Die Betriebskosten von Offshore-Windenergieanlagen und Konverterplattformen beinhalten einen wesentlichen Teil an Wartungs- und Instanthaltungskosten. Daher wurde bei den hier beschriebenen Arbeiten einen weiteren Schritt hin zu einer zustandsbasierten Wartung, die durch längerfristige Planungen mögliche Zeitfenster für Reparaturen optimal ausnutzen kann. Zur Erläuterung ist diese in Abbildung 1 dargestellt. Der Abnutzungsvorrat kann durch periodische Prüfung, wie es derzeit Standard ist, auf Anfangsniveau angehoben werden. Dies ist aber insbesondere im Offshore-Bereich mit hohen Kosten verbunden. Die am wenigsten wünschenswerte Möglichkeit ist eine ausfallbedingte Wartung, da die Anlage durch die schlechte Zugängigkeit u. U. lange nicht betrieben werden kann. Mit der zustandsabhängigen Wartung wird bei Erreichen eines bestimmten Zustandes die Wartung eingeplant. Dies muss in der Regel weniger häufig erfolgen als bei der periodischen Wartung, was zur Kosteneinsparung führt.

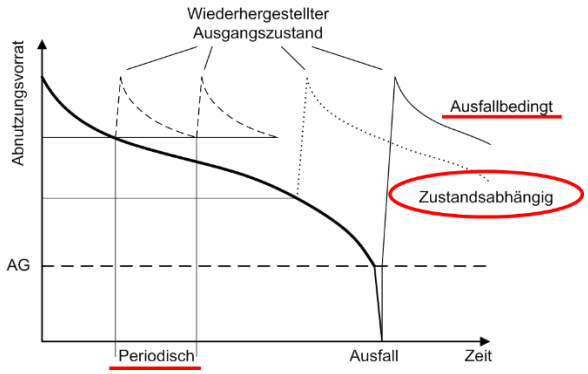

Abb. 1. Prinzip einer zustandsabhängigen Prüfung (in Anlehnung an DIN 31051 2003, S. 6)

Um dieses Ziel effizient zu erreichen, bietet sich der Einsatz von Unterwasserrobotern (Remotely Operated Vehicle – ROV) an. Viele Betreiber versuchen, Tauchstunden aufgrund der Gefahren und der Kosten gering zu halten. Durch die hier angestrebte Neuentwicklung werden Tauchzeiten-unabhängige Prüfzeiten möglich, die länger als die bisher gesetzlich vorgeschriebenen Tauchzeiten je Tauchgang[1] sind und somit die teure Offshore-Zeit besser ausnutzen. Die Kosten für Schiffsmiete inkl. Personal betragen üblicherweise ca. 40 000€/Tag, für ROV-Untersuchungen nur 15.000€/Tag. Durch die zu entwickelnde Technik wird es erstmals möglich, in wesentlich kürzerer Zeit die Prüfaufgaben in einem Windpark zu erfüllen und diese kontinuierlich durchzuführen. Perspektivisch könnten dadurch beispielsweise die Prüfintervalle für ältere Anlagen bei vertretbarem ökonomischem Aufwand erhöht und somit deren Laufzeiten über den ursprünglich geplanten Zeitraum hinaus verlängert werden.

Im Projekt wurden für die Sensormanschette CoMoBelt® ebenfalls neue Scherwellenwandler entwickelt. Diese Arbeiten sind aber nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung und können unter [1] eingesehen werden.

1. Umsetzung des Hardwarekonzeptes

In Vorgängerprojekten wurde das Prüfkonzept eines Sensorringes erfolgreich in Manschettenform umgesetzt. Es handelt sich dabei um eine flach laminierte Prüfmanschette

[1] Anlage 1 Tauchtabellen in der BGV C 23: abhängig von Wassertiefe und Strömungsverhältnissen max. alle 6h (Stauwasser) Arbeiten zwischen 30 und 60 Minuten zuzüglich Austauschzeit

mit verschiedenen Hardwarekomponenten, wobei sich eine kabelgebundene Lösung in praktischen Tests in Windparks als ungeeignet erwiesen hat [2],[3].

Diese nun hier vorgestellten Arbeiten konzentrieren sich daher auf das Ersetzen des Kabels durch eine kabellose Lösung mittels Wi-Fi und induktiver Energieübertragung, wie in Abbildung 2 dargestellt.

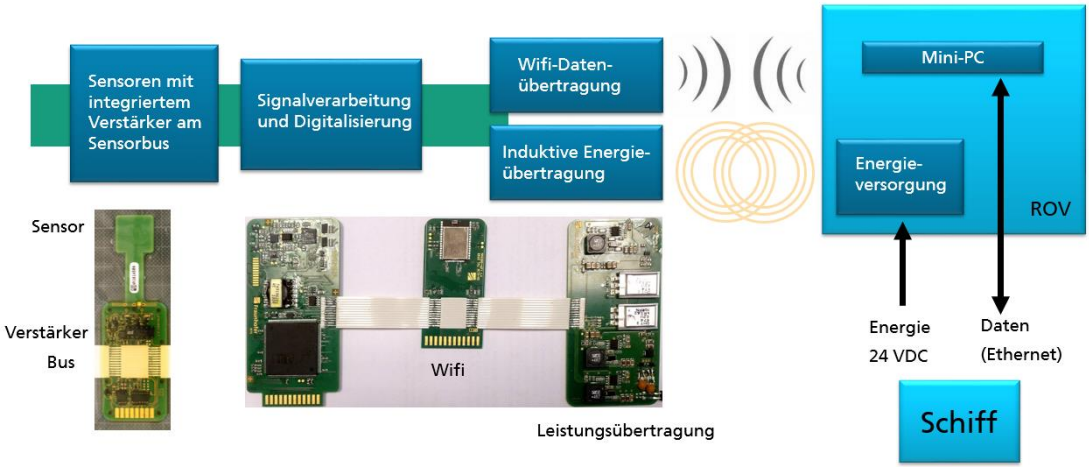

Abb. 2. Umgesetztes Technologiekonzept für eine Wireless- Stromversorgung und Wireless-Datenübertragung unter Wasser

Die Aktoren/Sensoren werden direkt angesteuert, wobei die Datenübertragung und Kommunikation über eine Wi-Fi-Verbindung realisiert wurde. Die Signalvorverarbeitung und auch die Digitalisierung erfolgen direkt am Sensor, um Störsignale gering zu halten. Nach der kabellosen Übertragung zu einem am ROV angebrachten Mini-PC und weiter über das ROV-Ethernet-Kabel zum Schiff.

Im unteren Bereich der Abbildung 2 sind die Hardwarekomponenten zu sehen, die im Folgenden näher erläutert werden.

1.1 Induktive Energieübertragung

Eine große Herausforderung dieses Projektes war eine ausreichende Bereitstellung von Energie mittels eines Spulenpaares für eine kabellosen Energieübertragung unter Wasser. Dieses Modul, wie es in Abbildung 3 zu sehen ist, wurde am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) entworfen, das Layout bereitgestellt und dann extern bestückt. Es konnte erfolgreich für Frisch- und Salzwasser in Betrieb genommen werden. Die Zielspannung an Gegenstelle betrug 30 VDC, die benötigte Eingangsspannung 24 VDC.

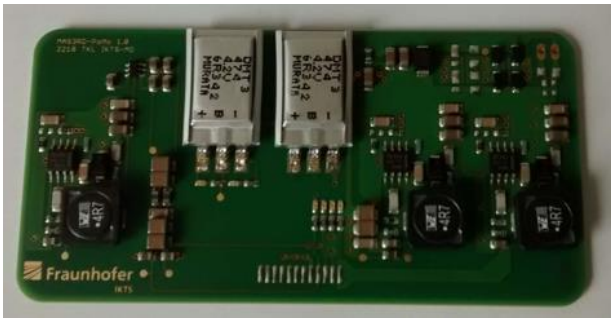

Abb. 3. Modul für die kabellose Energieübertragung

Die erreichten Parameter der Laboruntersuchungen für Strom und Spannung und die verschiedenen Abstände im Frisch- und Salzwasser können Tabelle 1 entnommen werden. Dafür wurden die Spulen in verschiedenen Abständen voneinander platziert und die Leistung mittels Strom- und Spannungsmessungen ermittelt.

Tabelle 1. Leistungsparameter für die kabellose Energieübertragung in Laboruntersuchungen

	Input current	Output voltage	Distance
Freshwater	297 mA	50 V	1 mm
	265 mA	45.2 V	2 mm
	257 mA	38.8 V	3 mm
	230 mA	35 V	4 mm
Saltwater 3%	225mA	48.8 V	1 mm
	210 mA	34.6 V	2 mm
	205 mA	31.9 V	3 mm
	200 mA	31. 5V	4 mm

1.2 Kabellose Unterwasserkommunikation

Die Datenkommunikation (Datenansteuerung und Messdatentransfer wie in Abbildung 4 gezeigt) nutzt ein Raspi–Wi-Fi-Modul (s. Abbildung 5). Eine Herausforderung war hier die Bereitstellung einer konstanten Spannung, so dass ein Spannungsstabilisator integriert werden musste. Die Daten werden über einen TCP-Socket an einen Mini-PC bzw. an einen Router übertragen.

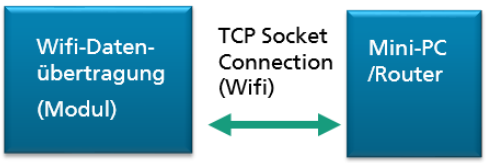

Abb. 4. Wi-Fi-Schnittstelle zur Datenkommunikation

Abb. 5 Wi-Fi-Modul

Im Rahmen der Unterwassertests unter Laborbedingungen sowie für den anschließend beschriebenen Hafenbeckentest konnte die Funktionalität nachgewiesen werden. Das Modul wurde für die Labormessungen vollständig eingetaucht.

Es wurden Datenraten von bis zu 300 kB/s erreicht. Auch der Salzwassereinfluss von 3% zeigt zumindest unter 4 cm Übertragungsstrecke zufriedenstellende Ergebnisse bis 280 KiB/s. Die detaillierten Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2. Ergebnisse der Unterwassertests der Wi-Fi-Verbindung

	Abstand Wasser	Abstand Luft	Datenrate
Süßwasser	20 cm	10 cm	150 KiB/s
	20 cm	-	160 KiB/s
	10 cm	(eingetaucht)	292 KiB/s
	0 cm	(eingetaucht)	291 KiB/s
Salzwasser, 3 %	10 cm	(eingetaucht)	-
	5 cm	(eingetaucht)	10 KiB/s
	< 4 cm	(eingetaucht)	280 KiB/s

2.1 Ankopplungseinheit und Manschettenbefestigung

Das Konzept der Koppeleinheit wurde für den Hafenbeckentest gefertigt und ist als 3D-Modell in Abbildung 6 dargestellt. Es wurde bewusst eine runde Form für die Ankoppeleinheit gewählt, um bei allseitigem Druck unter Wasser keine mechanischen Spannungsspitzen am Bauteil zu erzeugen. Zusätzlich wurde das Volumen von Anbauteilen gering gehalten, um den statischen Auftrieb unter Wasser zu minimieren.

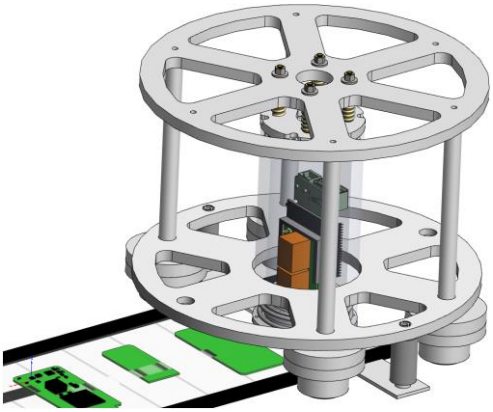

Abb. 6: ROV-Ankoppeleinheit mit Spule für Energieversorgung und Wi-Fi-Gegenstelle

Das Modell gliedert sich in zwei Komponenten. Die innenliegende Kapsel beinhaltet die erforderliche Elektronik zum Aufbau der Wi-Fi-Verbindung und Steuerung der Datenübertragung und zur Bereitstellung von Strom und Spannung zur Energieübertragung mit der Spule. Die Kapsel verfügt über einen abnehmbaren Deckel auf Ober- und Unterseite, welcher durch eine Doppel-O-Ring-Dichtung gegen Eindringen von Wasser in das Innere abgedichtet ist. Zur verlustarmen induktiven Energieübertragung wurde am Auflagepunkt der Spule im Deckel eine Wandstärke von 1 mm gewählt. Die gesamte Kapsel wurde aus dem Kunststoff Polyoxymethylene gefertigt, welcher über hohe Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften verfügt sowie eine geringe Wasseraufnahme aufweist. Notwendige mechanische Verschraubungen wurden mit Messingschrauben und zuvor eingebrachten Messinggewindeeinsätzen hergestellt. Die finale Docking-Einheit ist in Abbildung 7 zu sehen.

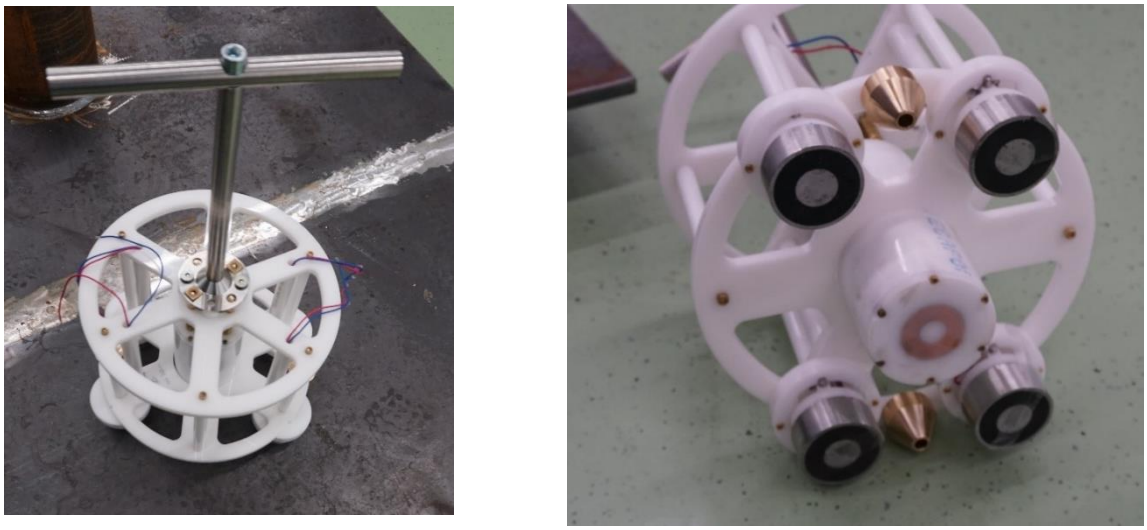

Abb. 7: Im Test verwendete Andockeinheit; rechts sind die 4 Elektromagneten, die Energieübertragungspule und die Konusse für die Positionierung in der Ansicht von unten zu sehen

2. Test des Hardwarekonzeptes im Hafenbecken

Die entwickelte Hardware wurde in zwei Hafenbeckentests beim assoziierten Partner Baltic Taucher in Rostock im April 2019 und im September 2020 getestet.

2.1 Verwendeter Demonstrator

Für die Hafenbeckentests wurde ein Demonstrator entworfen (s. Abbildung 8), der vielfältige Testmöglichkeiten bot und skaliert einem Ausschnitt aus einer reellen Offshore Jacket-Gründungsstrukturdarstellt.

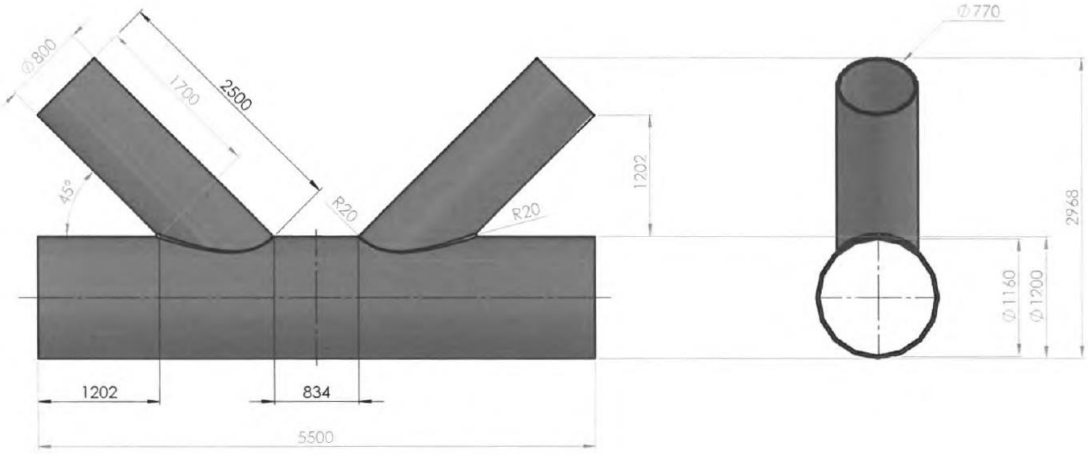

Abb. 8: Für die Hafenbeckentest verwendeter Stahldemonstrator Die Längenangaben sind in Millimeter

2.2 Remote Operated Vehicle (ROV)

Essenziell für diese Tests war die Verfügungstellung eines geeigneten ROV für die Messungen durch die Baltic Taucher (Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock GmbH). Es handelts sich dabei um ein Valor-ROV der Firma Seatronics[2], welches vergleichsweise klein ist und trotzdem die notwendigen Lasten transportieren kann (s. Abbildung 9).

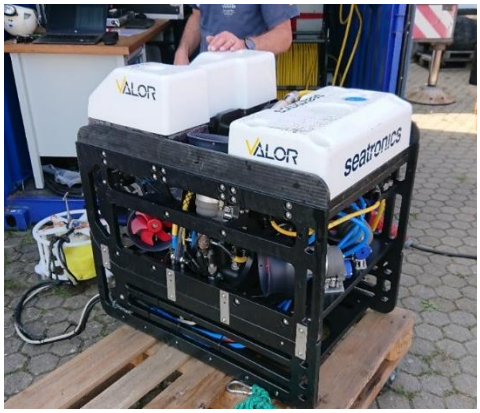

Abb. 9: Inspection-Class-ROV bei Baltic Taucher

2.3 Ergebnisse

Für den Test wurden zwei Manschetten angebracht, wie in Abbildung 10 zu sehen ist. Für die anschließend gezeigte Auswertung fanden nur Daten der mit grün markierten

[2] https://seatronics-group.com/subsea-inspection/observation-rov/seatronics-valor-rov/ (abgerufen 28.1.2021)

Manschette Verwendung. Um die Eignung des Verfahrens zu validieren, wurde ein künstlicher Riss mit den Dimensionen 70 x 5 x 2 mm^3 mit einem Winkelschleifer als Schweißnahtflankenfehler eingebracht.

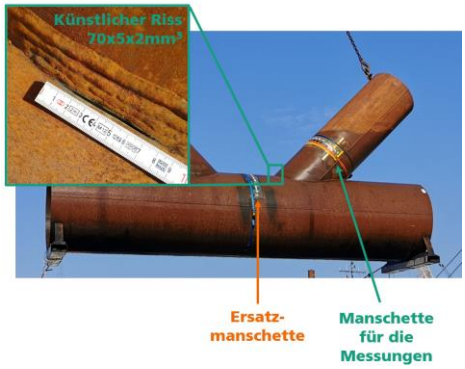

Abb. 10: Instrumentierter Rohrknoten während des Versuchs

Die Datenqualität wird in Abbildung 11 veranschaulicht, wobei es sich um das Gesamtsignal im oberen Bereich handelt. Es sind im Wesentlichen 2 Wellenpakete zu sehen, wobei im ersteren die Fehlerwechselwirkung zu finden ist und das Zweite die Randreflexion darstellt. In der vergrößerten Darstellung ist im Bereich um 500 µs eine Abweichung der beiden Signale zu erkennen, die durch den Schaden verursacht wurde. Durch die Überlagerung der Differenzensignale aller Pfadkombinationen im Tomographie-Algorithmus mit Berücksichtigung der komplexen Wellenausbreitung durch die Geometrie ergibt sich eine signifikante Schadensindikation.

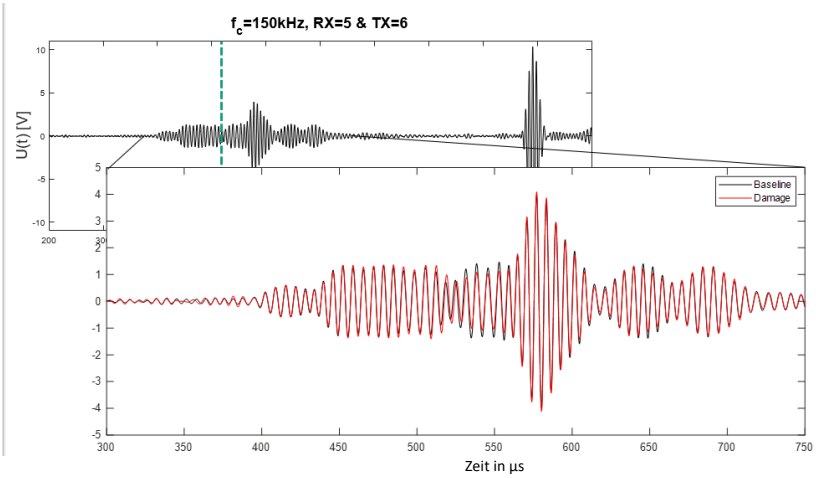

Abb. 11: Beispielsignal eines Pfades mit (rot) und ohne Schaden (schwarz)

Abbildung 12 zeigt das beispielhaft das Ergebnis der Bildgebung für die mittlere Anregungsfrequenz von 150 kHz. Die Dimensionen der Indikation korrelieren mit denen des künstlich eingebrachten Risses. Die beobachtete Datenqualität weist auf die Anwendbarkeit komplexerer Algorithmen hin, mit denen neben Lage und Größe noch zusätzlich Intensität bzw. Schadenstiefe aufgelöst werden könnten.

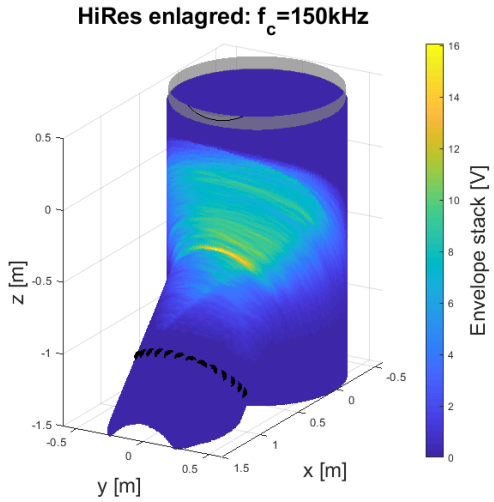

Abb. 12: Ergebnis der Messung mit künstlichem Riss

Zusammenfassung

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde für die am IKTS entwickelte Sensormanschette CoMoBelt® eine kabelloser Betriebsmodus von der Manschette zum ROV ermöglicht. Die Datenkommunikation erfolgte über Unterwasser-Wi-Fi und die Energieversorgung induktive über zwei Spulen. Weiterhin wurde eine neue Ankoppeleinheit entwickelt.

Ein finaler Test im Hafenbecken beim assoziierten Partner Baltic Taucher in Rostock zeigte die Eignung des Verfahrens und die gute erzielte Datenqualität. Ein künstlicher Riss konnte erfolgreich detektiert werden.

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das BMWi im Programm “Maritime Technologien” unter dem Aktenzeichen 03SX433C gefördert. Die Autoren bedanken sich beim PTJ Berlin für die kompetente Betreuung des Projektes und bei den Projektpartnern PI Ceramic und Invent sowie den assoziierten Partnern Baltic Taucher und TenneT für die angenehme und zielführende Zusammenarbeit.

Referenzen

[1] Gaul, T., Kim, Y., Weihnacht, B., Schubert, L.: Entwicklung von piezoelektrischen Scherwellenwandlern für die Zustandsüberwachung von Offshore-Gründungsstrukturen; Proc. DACH-Jahrestagung 2019, 27. – 29. Mai 2019 in Friedrichshafen

[2] Weihnacht, B., Frankenstein, B., Gaul, T.; Neubeck, R.; Schubert, L.: Offshore foundation monitoring by guided waves - challenges and perspectives, 19th World Conference on Non-Destructive Testing, WCNDT 2016: Munich, Gemany, 13-17 June 2016; Proceedings

[3] Weihnacht, B., Frankenstein, B., Gaul, T.; Neubeck, R.; Schubert, L.: Monitoring of welded seams on the foundations of offshore wind turbines, Insight 59 (2017), Nr.2, S.72-76