

# Unterwasser-Verformungsmessungen von Grouted Joints

Patrick Rzeczkowski<sup>1</sup> und Ludger Lohaus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland*

## **KURZFASSUNG:**

Die Verbindung zwischen dem in den Boden gerammten Pfahl und der Tragstruktur von Offshore-Windenergieanlagen wurde in Deutschland inzwischen bei über 1000 Anlagen als Grouted Joint ausgeführt. Nachdem es im Ausland bei zahlreichen Monopiles zu einem Durchrutschen von Groutverbindungen gekommen war, entstand zunehmend der Wunsch, Relativverschiebungen zwischen Pile und Sleeve von Offshore-Windenergieanlagen überwachen zu können, um eine langfristige Beurteilung des Tragverhaltens der Groutverbindung zu ermöglichen. Dies kann bei Grouted Joints im Bereich über Wasser verhältnismäßig einfach durchgeführt werden. Eine große Herausforderung ist hingegen die Messung von Verschiebungen unter Wasser. Nach dem Test eines ersten Prototyps hat das Institut für Baustoffe inzwischen eine verbesserte mobile Messeinheit entwickelt, um diese Messaufgabe realisieren zu können.

Keywords: Offshore-Windenergie, Grouted Joint, Structural Health Monitoring, mobile Messeinheit, Messungen unter Wasser

## **ABSTRACT:**

The connection between the driven pile and the supporting structure of offshore wind turbines has so far been implemented as a grouted joint in over 1000 wind turbines in Germany. After the slipping of grouted connections in numerous monopiles abroad, there was an increasing interest in monitoring relative displacements between pile and sleeve of offshore wind turbines in order to allow a long-term evaluation of the load-bearing behaviour of grouted connections. This can be performed with manageable effort for supporting structures with grouted joints located above water. A major challenge, however, is the measurement of displacements under water. After the test of a first prototype, the Institute of Building Materials Science has now developed an improved mobile measuring unit in order to be able to carry out this measuring task.

Keywords: Offshore wind energy, grouted joint, structural health monitoring, mobile measuring unit, underwater measurement

## 1 EINLEITUNG

Der Verfüllprozess von Grouted Joints erfordert besondere Aufmerksamkeit, da er trotz sorgfältiger Vorbereitung ein fehleranfälliger und schwierig zu überwachender Vorgang ist. Ein negativer Einfluss auf das Grout-Material, beispielsweise bei Störfällen, kann demnach nicht ausgeschlossen werden. Im Laufe des Betriebs könnten sich Ausführungsfehler der Verbindung durch die Beanspruchungen infolge Wind und Wellen ausweiten. Besondere Aufmerksamkeit erregten Schäden an Monopiles im Ausland, vor allem in Dänemark, Großbritannien und den Niederlanden, bei denen es in einigen hundert Fällen zu einem Durchrutschen von Groutverbindungen gekommen war (Schaumann et al. 2010).

Aus diesem Grund wurde am Institut für Baustoffe in Hannover eine mobile Messeinheit für die Unterwasseranwendung an Grouted Joints entwickelt, die es ermöglicht, relative Verschiebungen zwischen Pile und Sleeve der Verbindung zu erfassen. Der erste Prototyp der Messeinheit wurde unter maritimen Bedingungen im Betrieb einer Offshore Windenergieanlage (OWEA) in etwa 25 m Wassertiefe installiert und getestet. Die Messungen wurden an einer Tripod-Struktur im Testfeld alpha ventus durchgeführt (vgl. Bild 1). Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Messeinheit an anderen Arten von Offshore-Gründungsstrukturen zu installieren, wie z. B. Jacket-Gründungen oder Monopiles. Der Prototyp der Messeinheit hat im Wesentlichen seine Funktionalität demonstriert. Nach neunmonatigem Einsatz in der Nordsee wurde jedoch ein Wassereinbruch verzeichnet. 13 Monate nach dem Wassereinbruch konnte die Messeinheit geborgen und anschließend untersucht werden. In einem Nachfolgeprojekt konnten die Schwachstellen identifiziert und die Performance hinsichtlich Langlebigkeit und Zuverlässigkeit in einem weiteren Entwicklungsschritt gesteigert werden.

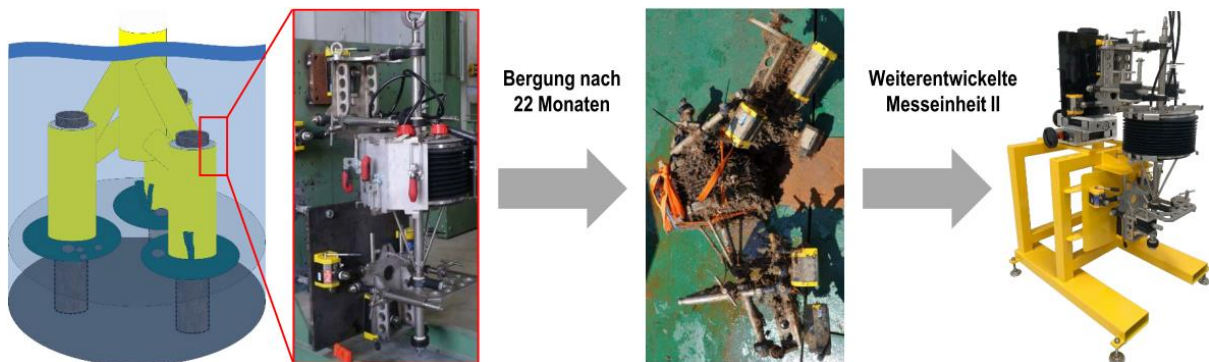


Bild 1: Montierte Prototyp-Messeinheit (links), geborgene Prototyp-Messeinheit (mitte) und weiterentwickelte Messeinheit II (rechts)

Durch die Umgebungsbedingungen einer OWEA stellen die Konstruktion und Installation der Messeinheit eine große Herausforderung dar. Trotz einer Wassertiefe von 25 m und der unvermeidlichen Ausführungstoleranzen soll die Messeinheit so befestigt und betrieben werden können, dass die Bestimmung des relativen Weges zwischen Pile und Sleeve präzise erfolgen kann. Dabei ergeben sich zwei wesentliche Herausforderungen: Installationsbedingte Toleranzen bei der Positionierung von Pile und Sleeve resultieren in unbekanntem geometrischen Randbedingungen, die in der Konstruktion der Messeinheit zu berücksichtigen sind. Zudem stellt die aggressiv-korrosive Unterwasser-Umgebung am Installationsort ein großes Problem für die dauerhafte Funktion des Messsystems dar.

## 2 MESSTECHNISCHES KONZEPT

### 2.1 Prototyp-Messeinheit

Geometrische Randbedingungen, die für die Installation der Messeinheit entscheidend sind, können nicht präzise vorhergesagt werden. Herstellungsbedingte Ungenauigkeiten zwischen dem Sleeve und dem in den Boden eingerammten Pile verhindern dies. Dadurch wird eine hohe Flexibilität der Auflagerkomponenten der Messbox gefordert. Diese wird durch ein Stabwerkssystem aus korrosionsbeständigen Edelstahlkomponenten gewährleistet. Nach der Installation ist die Steifigkeit der Messkonstruktion sowie der verschiebungsfreie Verbund mit dem Grouted Joint maßgebend für die Genauigkeit der Messungen. Hierfür wurde eine Konstruktion entworfen, die während der Installation dreidimensional verstellbar ist, aber gleichzeitig nach der abgeschlossenen Montage unverschieblich bleibt. Um dies zu ermöglichen, wurden zum Verbinden des Stabwerkssystems Gelenkköpfe eingesetzt, die sich aufgrund unterschiedlicher Quellmaße von Gehäuse und Kugelkopf dazu führen, dass der Kugelkopf sich gegen das Gehäuse drückt und das Lagerspiel bereits nach einer Woche im Meerwasser auf nahezu null setzt, ohne die Absolutposition der Kugelkopfachse zu verändern (Rolfes et al. 2013). Hierdurch sollen ausschließlich die Relativbewegungen in der Tragstruktur gemessen werden. Der Einsatz der aus Kunststoff bestehenden Gelenkköpfe ermöglicht außerdem eine vollständige galvanische Trennung hinsichtlich des aktiven Korrosionsschutzes der Anlage. Neben den Gelenkköpfen ist eine zusätzliche Anpassung der Messeinheit über klemmbare Schiebehülsen vorgesehen, welche die präzise Ausrichtung der Messeinheit trotz unbekannter geometrischer Randbedingungen ermöglicht.

Sechs schaltbare Lasthebemagnete erlauben die Positionierung und Fixierung der Messeinheit an der Gründungstruktur. Diese Magnete werden üblicherweise in der Metallindustrie eingesetzt und passen sich durch einen gelenkigen Anschluss an die unebene Stahloberfläche von Pile und Sleeve an.

Der mit der Konstruktion sowohl form- als auch kraftschlüssig verbundene Messraum besteht aus einem mit Öl gefülltem Gehäuse. Das Öl sorgt für eine korrosionsgeschützte Umgebung für die Sensoren und kompensiert durch seine geringe Kompressibilität den aufkommenden Wasserdruck (Lück 2010). Aufgrund ihrer guten Verträglichkeit gegenüber Kunststoffen bieten sich Paraffinöle mit geringer Viskosität bei niedrigen Temperaturen an (Rolfes et al. 2013). Es ist ein flexibler Raumabschluss notwendig, der im Falle von relativen Verschiebungen zwischen Pile und Sleeve eine ungehinderte Verschiebung der Messkonstruktion möglichst widerstandsfrei zulässt. Zwei lotrecht gegenüberliegende Kreisplatten werden hierfür in zwei Lagen von beweglichen Gummimembranen (Elastomer-Faltenbalgen) umschlossen (vgl. Bild 8). Die zu erwartenden relativen Verschiebungen der Anlage werden in den Messraum übertragen und können in alle Richtungen durch die Flexibilität der Membrane nahezu widerstandsfrei erfasst werden. Im Messraum wurde folgende Sensorik untergebracht:

- Zwei vertikale und zwei horizontale induktive Wegaufnehmer zur Erfassung der relativen Verschiebungen zwischen Pile und Sleeve
- Zwei baugleiche „Dummy-Sensoren“, die so angebracht sind, dass keine Verschiebungen gemessen werden, um so zeitabhängige Einflüsse auf das Messsignal kompensieren zu können
- Ein Temperatursensor zur möglichen Korrektur der aufgezeichneten Messdaten
- Ein Leckagesensor zur Signalisierung eines möglichen Wassereintruchs

Die induktiven Wegaufnehmer werden auf der oberen Kreisplatte montiert und tasten gegen Anschlagpunkte der unteren Kreisplatte innerhalb eines durch angeschraubte Platten definierten Bewegungsspielraums. Für den Transport und die Installation der Messeinheit ist es erforderlich, den

Messraum durch seitliche Bleche zu fixieren. Die induktiven Wegaufnehmer befinden sich dadurch in ihrer Nullstellung.

## 2.2 Schwachstellen des Prototyps

Eine Analyse der geborgenen Prototyp-Messeinheit hat gezeigt, dass Korrosionsvermeidung eine wesentliche Herausforderung darstellt. Bild 2 zeigt eine Übersicht auffallend stark von Korrosion betroffener Komponenten. Besonders gefährdet sind hierbei die Kabeldurchführungen, die die Verbindung zur Sensorik ermöglichen und gleichzeitig das Eindringen von Wasser in den Messraum verhindern sollen. Die Kabeldurchführungsbauteile wurden in eine dafür vorgesehene Öffnung mit Gewinde ins Gehäuse eingeschraubt. Nach der Bergung der Prototyp-Messeinheit wiesen die Gewinde der Kabeldurchführungen besonders starke Korrosionserscheinungen auf. Die Korrosion war teilweise so weit fortgeschritten, dass die Gummidichtung frei lag (vgl. Bild 2). Damit einher gingen ebenfalls starke Korrosionserscheinungen an den Gewinden der Öffnungen für die Kabel in der oberen Kreisplatte des Messraums.

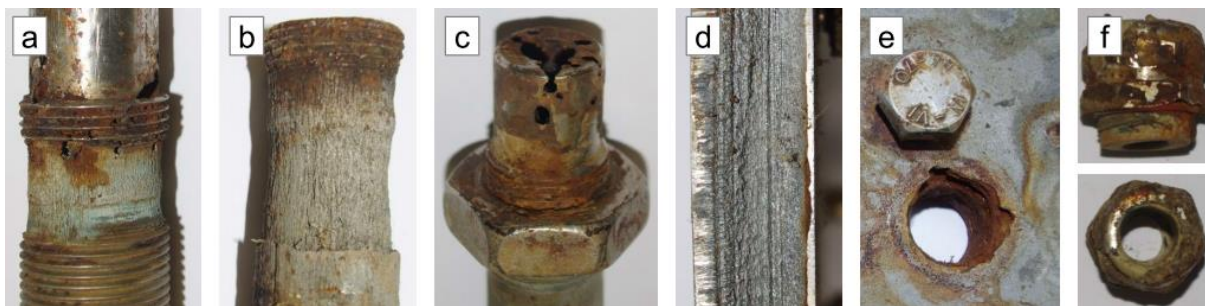


Bild 2: Stark korrodierte Komponenten der Prototyp-Messeinheit (a, b, c: stabförmige Bauteile, d: Ausschnitt Kreisplatte, e: Kabeldurchführung, f: Kabeldurchführungsbauteil)

Aufgrund der starken Korrosionserscheinungen verloren die Kabeldurchführungsbauteile ihre Dichtwirkung, was zum Wassereintritt in den Messraum führte und vermutlich auch zum Versagen der Sensoren (Rolfes et al. 2013). Im Mai 2011 war ein Ausschlag der Leckagemessung zu erkennen. Kurz darauf zeigten die Messdaten unstetige Bewegungen der Relativverschiebungen und der Dummy-Sensoren (vgl. Bild 3).

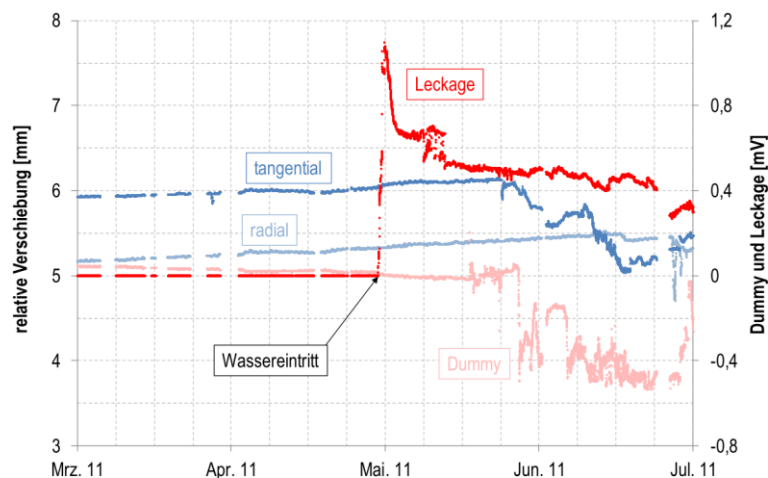


Bild 3: Relativverschiebungen, Dummy- und Leckage-Signal im März bis Juli 2011 (Rzeczkowski et al. 2019)

Neben den Kabeldurchführungen wiesen weitere Bauteile der geborgenen Prototyp-Messeinheit starke Korrosionserscheinungen auf. An den Kontaktflächen zwischen der äußeren Membran und den Kreisplatten war der Edelstahl (Werkstoff 1.4571) stark korrodiert, was vermutlich in absehbarer Zeit ebenfalls zu einem Wassereintritt geführt hätte. Die oberen Kreisplatten sind mit einem Laser geschnitten worden. Eine mögliche Erklärung für die starken Korrosionserscheinungen ist, dass in der Wärmeeinflusszone des Laserschnitts die schützende Chromoxydschicht lokal zerstört worden ist und eine interkristalline Korrosion des Edelstahls ermöglichte (Henkel et al. 2015).

Besonders ungewöhnlich waren die auffallend starken Korrosionserscheinungen bei einem Großteil der stabförmigen Bauteile der Messkonstruktion. Diese waren augenscheinlich deutlich an den vertikalen Stäben, die die beiden Kreisplatten des Messraums mit der restlichen Messkonstruktion verbinden, sowie am obersten und untersten horizontal angeordneten Stab, zu erkennen. Besonders im Bereich der Edelstahlmutter zum Kontern der Gelenkköpfe und der Kreisplatten war ein ungewöhnlich großer Materialabtrag feststellbar. Aufnahmen eines dieser Bauteile mit einem Computertomographen ließen zudem eine Lochkorrosion bis tief in das Bauteil hinein erkennen (vgl. Bild 4). Diese Korrosionserscheinungen hätten in absehbarer Zeit zur Verringerung der Steifigkeit der Messeinheit und zu einem Lösen der Kreisplatten geführt, wodurch die Messungen ebenfalls unbrauchbar geworden wären.



Bild 4: Korrodiertes stabförmiges Bauteil der Prototyp-Messeinheit aus GIGAWIND alpha ventus (links) und CT-Aufnahme des Bauteils (mitte, rechts) (Lohaus et al. 2017)

Die restlichen stabförmigen Bauteile wiesen hingegen keine nennenswerten Korrosionserscheinungen auf. Aus diesem Grund wurden Proben aus den stark korrodierten Bauteilen und als Referenz auch an Stellen ohne Korrosionserscheinung entnommen und mittels Funkenspektroskopie untersucht. Die Auswertung ergab eine deutlich niedrigere Legierung der hinsichtlich Korrosion auffälligen Bauteile. Folglich wirkte die Messkonstruktion im Meerwasser als Kathode und unterstützte somit die Korrosion der niedriger legierten Bauteile, die wiederum (ungewollt) als Anode fungierten. Dieser Effekt wurde durch die im Vergleich zu den korrodierten Bauteilen deutlich größere Oberfläche der restlichen (kathodisch wirkenden) Messkonstruktion unterstützt.

Sowohl bei Trockenübungen auf dem Schiff als auch bei der späteren Montage des Prototypen an der Gründungsstruktur traten aufgrund des Eigengewichts der Messeinheit Klemmwirkungen an den Schiebehülsen auf. Diese führten nach Abschluss der Montage zu elastischen Spannungen in den Fixierplatten des Messraumes. Das Entfernen der Platten führte anschließend zu einer ungewollten Veränderung der Nullstellung der induktiven Wegaufnehmer. Die vertikalen Verschiebungen waren dabei größer als der Messbereich der vertikal angeordneten Wegaufnehmer und führten folglich zum Ausfall (Rolfes et al. 2013).

### 2.3 Weiterentwickelte Messeinheit (Messeinheit II)

Die Weiterentwicklung der Messeinheit war ein iterativer Prozess. So wurden alle konstruktiven Details und Komponenten, die sich bei den Messungen an der Gründungsstruktur der realen OWEA bewährt hatten, übernommen. Die im vorherigen Abschnitt festgestellten Schwachstellen, die zum Ausfall der Messeinheit geführt hatten oder in absehbarer Zeit geführt hätten, wurden weiterentwickelt, um die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Lebensdauer und der Messgenauigkeit der Messeinheit zu steigern. Obwohl die schaltbaren Lasthebemagnete aufgrund der erforderlichen hohen magnetischen Haftkraft aus einem korrosionsanfälligen Stahl gefertigt waren und somit eigentlich besonders gefährdet für eine dauerhafte Unterwassernutzung sind, wiesen sie nur sehr geringe Korrosionserscheinungen an der Oberfläche auf (vgl. Bild 5). Sie waren durch den Anschluss an die Gelenkköpfe aus Kunststoff galvanisch von der restlichen Messkonstruktion entkoppelt und profitierten somit vom aktiven Korrosionsschutz der Gründungsstruktur. Sie konnten direkt während und nach der Bergung geschaltet werden. Nach dem Trennen der Magnete von der Anlage wurde während der anschließenden Lagerung der Prototyp-Messeinheit ein starker Korrosionsprozess beobachtet, was die Wirksamkeit des aktiven Korrosionsschutzes der Anlage illustriert.

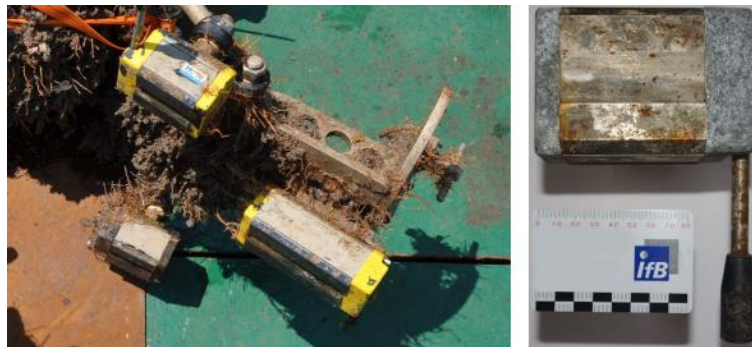


Bild 5: Geborgene Prototyp-Messeinheit (links) und Lasthebemagnet (rechts) aus GIGAWIND alpha ventus

Um erneute Korrosionserscheinungen bei den stabförmigen Bauteilen der Messkonstruktion zu vermeiden, wurde bei der Herstellung von Messeinheit II ausschließlich Material mit der Edeltstahlgüte 1.4571 verwendet. Zusätzlich wurden alle geschweißten Komponenten der Messeinheit mit Glasperlen gestrahlt, um korrosionsfördernde Rückstände zu entfernen.

Durch die Erweiterung der Sensorik wurde eine weitere Kabeldurchführung benötigt, die gleichzeitig auch eine weitere potentielle Schwachstelle hinsichtlich Wassereintruchs im System darstellte. Bei der Prototyp-Messeinheit war dies die größte Schwachstelle und führte zum Abbruch der Messungen. Aus diesem Grund wurde eine Edelstahlverschraubung für Offshore-Anwendungen mit Seewasserbeständigkeit (Schutzarten IP68 und IP69) eingesetzt (vgl. Bild 6), die auch bei hohem Umgebungsdruck den Messraum vor einem Wassereintritt schützt.



Bild 6: Seewasserbeständige Kabeldurchführungsbauteile von Messeinheit II (Rolfes et al. 2018)

Der Raumabschluss durch bewegliche Gummimembrane wurde beibehalten, da diese nach der Bergung in einen guten Zustand waren. Um die Korrosionserscheinungen an den Berührungsflächen zu den Edelstahlkomponenten zu verhindern, wurden die Kreisplatten mit einem Laser zunächst im Durchmesser etwas größer zugeschnitten. Anschließend wurden die Platten auf das benötigte Maß gefräst, um das Material aus der Wärmeinflusszone des Laserschnitts zu entfernen und somit einer erneuten interkristallinen Korrosion vorzubeugen.

Um erneute Klemmwirkungen während der Montage zu verhindern, wurde die Messkonstruktion angepasst, wobei vier der fünf Schiebehülsen durch ein vierteiliges lasergesintertes Kugelgelenksystem aus Polyamid (PA2200) ersetzt wurden (vgl. Bild 7). Durch dieses System erhält die Messkonstruktion zusätzliche Freiheitsgrade, wodurch die Messeinheit während der Montage leichter an die unbekannt geometrischen Randbedingungen der Gründungsstruktur angepasst werden kann. Bei Trockenübungen an einem Prüfstell konnten zudem keine Klemmwirkungen mehr festgestellt werden.

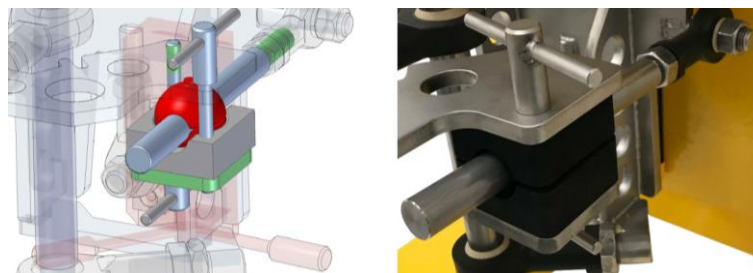


Bild 7: Neues Kugelgelenksystem von Messeinheit II (Rolfes et al. 2018)

Die Messeinheit wurde konstruiert, um relative Verschiebungen zwischen Pile und Sleeve zu erfassen. Dieses Konzept schließt es jedoch aus, die Messwerte den Verschiebungen der oberen oder unteren Messkonstruktion zuzuordnen. Bewegungen der Gründungsstruktur können so nicht von anderen Einflüssen, wie z. B. dem Anprall von Treibgut oder sich lösenden Magneten, unterschieden werden. Bei Messungen der Prototyp-Messeinheit im Testfeld alpha ventus traten teilweise sprunghafte Verschiebungen auf (vgl. Abschnitt 3.1), die nicht plausibel auf Verschiebungen innerhalb der Groutverbindung zurückgeführt werden können. Um solche Ereignisse besser erfassen und erklären zu können, wurde die Messeinheit II um zwei triaxiale Beschleunigungssensoren erweitert. Sie sind jeweils an der oberen und unteren Kreisplatte des Messraumes angebracht und somit jeweils Pile oder Sleeve zugeordnet. Sie sind so ausgerichtet, dass die jeweiligen Achsen parallel zu denen der induktiven Wegaufnehmer messen (vgl. Bild 8).

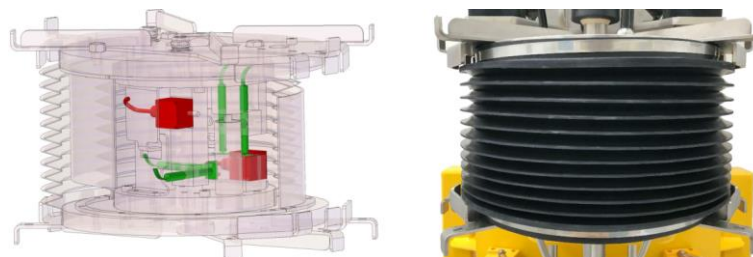


Bild 8: Anordnung der induktiven Wegaufnehmer (grün) und der triaxialen Beschleunigungssensoren (rot) in Messeinheit II (Rolfes et al. 2018)

Um weitere Fehlerquellen auszuschließen, wurde ein Prüfstell konstruiert, das eine möglichst realitätsnahe Simulation der Montage der weiterentwickelten Messeinheit II ermöglicht (vgl. Bild 9). Die Anschlagpunkte für die Magneten sind dabei der Geometrie der realen Gründungsstruktur nachempfunden. So wird auch die Krümmung von Pile und Sleeve nachgebildet. Die untere

Anschlagplatte stellt den Sleeve nach und ist starr mit der Konstruktion des Prüfgestells verbunden, während die obere Anschlagplatte auf drei Linearmodulen lagert. Sie ermöglichen dreidimensionale Verschiebungen der oberen Messkonstruktion. Dadurch kann die Relativverschiebung zwischen Pile und Sleeve simuliert und die Messeinheit kalibriert werden. Darüber hinaus können durch die veränderbare Geometrie unterschiedliche Szenarien bei der Montage der Messeinheit erprobt werden.



Bild 9: Prüfgestell (links), Linearmodulsystem (mitte) und Prüfgestell mit installierter Messeinheit II (rechts) (Rzeczkowski et al. 2019)

### 3 MESSERGEBNISSE

#### 3.1 *In-situ-Messungen*

Aufgrund des Ausfalls der vertikal angeordneten Wegaufnehmer musste die Auswertung der Daten auf die beiden horizontalen (radial und tangential angeordneten) Wegaufnehmer beschränkt werden (Rolfes et al. 2013). Bild 10 zeigt eine Übersicht der aufgezeichneten Messdaten als 10-Minuten-Mittelwerte von November 2010 bis März 2011. Zusätzlich zu den radialen und tangentialen Relativverschiebungen sind in dem Diagramm die gemessenen Windgeschwindigkeiten auf der Forschungsplattform FINO1 in 90 m Höhe aufgetragen. Als Indikator, zu welchem Zeitpunkt mit verstärkten Belastungen zu rechnen ist, sind hier nur alle Windgeschwindigkeiten über 18 m/s dargestellt.

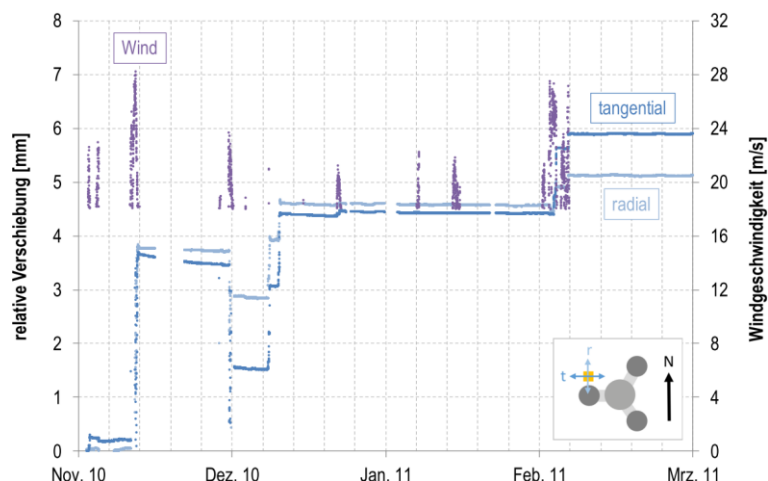


Bild 10: Horizontale Relativverschiebungen (radial und tangential) der Prototyp-Messeinheit und Windgeschwindigkeit im Zeitraum November 2010 bis März 2011 (Rolfes et al. 2013)

Die Relativverschiebungen weisen ein sprunghaftes Verhalten bei Sturmereignissen mit Windgeschwindigkeiten größer 23 m/s auf (vgl. Bild 10). Solche Sprünge bis zu etwa 4 mm sind von einer Groutverbindung nicht zu erwarten und somit wahrscheinlich auf Bewegungen innerhalb der



Messkonstruktion, wie bspw. durch Anprall von Treibgut oder ein Verrutschen der Magnete, zurückzuführen.

In Bild 11 wird exemplarisch ein Sturmereignis aus Bild 10 am 05. Februar 2011 näher betrachtet. Hierfür sind erneut die 10-Minuten-Mittelwerte dargestellt, ergänzt um die Minimal- und Maximalwerte. Durch die höhere Auflösung der Darstellung werden die Charakteristika der Verläufe sichtbar. Die relativen Verschiebungen weisen während des Sturmereignisses einen treppenförmigen Verlauf mit erhöhten Streuungen des Messsignals zum Zeitpunkt der irreversiblen Verschiebungen auf.

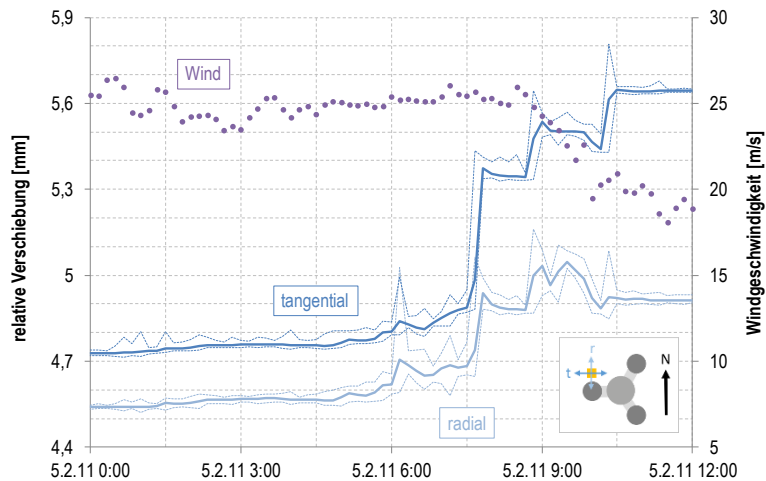


Bild 11: Horizontale Relativverschiebungen (radial und tangential) der Prototyp-Messeinheit und Windgeschwindigkeit im Zeitraum zwischen 0:00 und 12:00 Uhr am 05. Februar 2011

In Bild 12 wurde die Auflösung erneut erhöht, um die Messdaten für einem Zeitraum von 10 Minuten zu betrachten. Neben den horizontalen Relativverschiebungen sind in diesem Diagramm zusätzlich die Messwerte eines Dehnungsmessstreifens (DMS), der in einer Messebene der aufgehenden Strebe des Westbeins der Tripod-Struktur appliziert ist, aufgetragen.

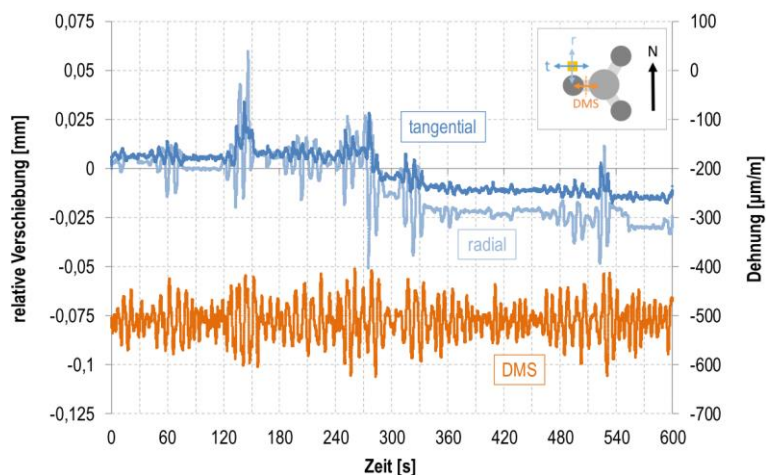


Bild 12: Horizontale Relativverschiebungen (radial und tangential) der Prototyp-Messeinheit und Dehnung mit DMS (Strebe Tripod-Westbein) zwischen 6:30 und 6:40 am 05. Februar 2011

Besonders in radialer Richtung ist eine Korrelation zwischen den Messwerten der Prototyp-Messeinheit und der strukturmechanischen Antwort des DMS zu erkennen. Die Amplitude von bis zu 0,03 mm sowie die übereinstimmende Frequenz zwischen DMS und den Wegaufnehmern lässt auf eine elastische Beanspruchung des Grouted Joints schließen (Rolfes et al. 2013).

### 3.2 Messungen am Prüfgestell

Direkt nach der Montage wurde die weiterentwickelte Messeinheit II mit Hilfe des Prüfgestells kalibriert. Hierfür wurden mit den Linearmodulen relative Wege zwischen den beiden Kreisplatten des Messraumes aufgebracht und durch eine externe Laserwegmessung aufgezeichnet (vgl. Bild 13). Die zuvor direkt an den induktiven Wegaufnehmern ermittelten Linearitätsfaktoren konnten mit sehr geringer Abweichung durch die externe Laserwegmessung bestätigt werden (Rolfes et al. 2018).

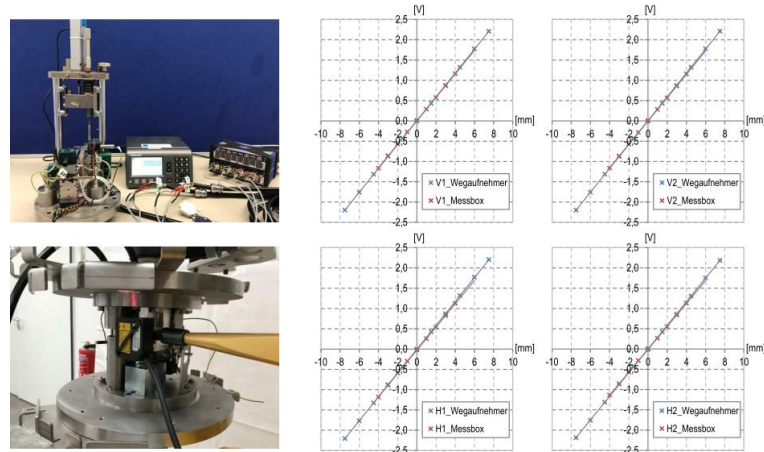


Bild 13: Kalibrierung der induktiven Wegaufnehmer (Bild oben), Kalibrierung der Messeinheit II (Bild unten) und Kalibrierdiagramme (mitte, rechts) (Rolfes et al. 2018)

Die teilweise sprunghaften Messungen der Prototyp-Messeinheit wurden bei Messeinheit II mit Hilfe des neuen Prüfgestells simuliert. Hierfür wurde der obere Teil der Messkonstruktion abrupt um etwa 1,3 mm nach unten bewegt. Die dabei aufgetretenen Relativverschiebungen wurden mit der Messeinheit aufgezeichnet. Bild 14 veranschaulicht die vertikalen Relativverschiebungen durch die ruckartig aufgebrachte Bewegung und den daraus resultierenden Absolutwert der Beschleunigung, reduziert um den Einfluss der Erdbeschleunigung. Aufgrund der zusätzlichen Messung mit den Beschleunigungssensoren konnte die ruckartige Verschiebung eindeutig der oberen Messkonstruktion zugeordnet werden. Es ist zusätzlich zu erkennen, dass die die ruckartige Verschiebung eine Schwingung zur Folge hat, deren Abklingen man im Diagramm nachvollziehen kann. Dies ist vermutlich auf das Spiel in den Linearmodulen und eine Übertragung der Schwingungen auf das komplette Prüfgestell zurückzuführen, wodurch auch der Beschleunigungssensor der unteren Messkonstruktion einen Ausschlag anzeigt.

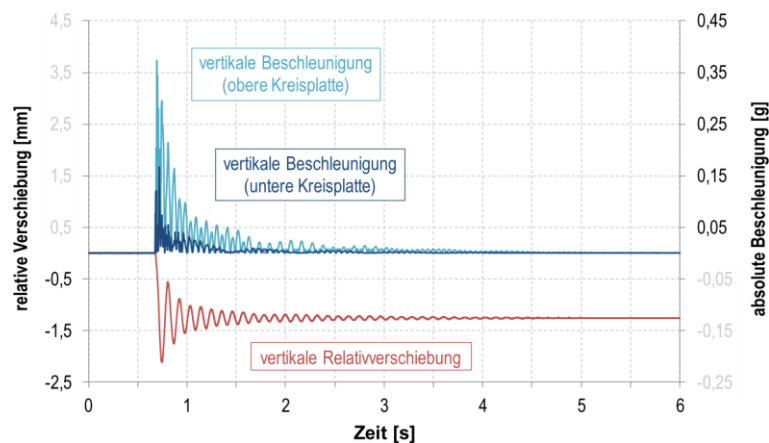


Bild 14: Simulation einer ruckartigen vertikalen Bewegung der oberen Messkonstruktion von Messeinheit II (Rzeczkowski et al. 2019)

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für Baustoffe wurde der Prototyp einer Messeinheit zur Erfassung von Relativverschiebungen zwischen Pile und Sleeve eines Grouted Joints entwickelt, gebaut und an der Gründungsstruktur einer realen Anlage installiert. Die Aufzeichnung der Messdaten musste auf die horizontalen Wegaufnehmer beschränkt werden, da die vertikalen Wegaufnehmer direkt nach der Installation ausfielen. Trotz umfangreicher Vorkehrungen war die im Messraum befindliche Sensorik nicht ausreichend vor Korrosion geschützt, um eine dauerhafte Messung zu gewährleisten. Die aufgezeichneten Daten belegen dennoch die grundsätzliche Funktionalität der Prototyp-Messeinheit, Relativverschiebungen an Offshore-Gründungsstrukturen in einer Wassertiefe von bis zu 25 m zu erfassen. Die gewonnenen Erkenntnisse der Pilotmessung geben erstmalig Größenordnungen realer Relativverschiebungen zwischen Pile und Sleeve einer Groutverbindung am Meeresboden an.

Auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen wurde die Prototyp-Messeinheit weiterentwickelt, mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Lebensdauer und der Messgenauigkeit der Messeinheit zu steigern. Die neue Messeinheit ist fertiggestellt und für die Installation an einer neuen Gründungsstruktur einsatzbereit. Für den dauerhaften Einsatz als Monitoringsystem wurde der Korrosionsschutz an mehreren Details konsequent verbessert. Auch die Fixierung an Pile und Sleeve wurde angepasst, um inneren Klemmwirkungen im System vorzubeugen. Zusätzlich wurde das Sensorsystem um Beschleunigungssensoren erweitert, um mögliche Sprünge im Messsignal Störereignissen auf Seiten des Piles oder der Tragstruktur zuordnen zu können. Schließlich gelang es, mit Hilfe eines speziell konstruierten Prüfgestells, die Installation der Messeinheit realitätsnah zu simulieren, diese zu kalibrieren und relative Verschiebungen zwischen Pile und Sleeve aufzuzeichnen.

## 5 AUSBLICK

Für den zukünftigen Einsatz der Messeinheit II als Monitoringsystem für Grouted Joints ist es unerlässlich, die gesteigerte Leistungsfähigkeit unter möglichst realen Bedingungen zu validieren. Die beste Option ist eine erneute Installation an der Gründungsstruktur einer Offshore-Windenergieanlage. Üblicherweise verfügen Windparks nicht über so eine umfangreiche Messinfrastruktur wie das Testfeld alpha ventus, um die Daten der Messeinheit aufzuzeichnen. Eine mögliche Lösung wäre die Erweiterung der Messeinheit um eine Art „Black Box“, die eine eigene Energieversorgung des Messsystems sowie die autonome Aufzeichnung und Speicherung der Daten ermöglicht.

Alternativ könnte eine Messkampagne in einem Wellenkanal durchgeführt werden, um die Eignung der Messeinheit für den Unterwassereinsatz zu überprüfen und nachzuweisen. Dies würde die Herstellung einer Konstruktion erfordern, die Bewegungen aufgrund der Wellenbelastung zulässt und somit die relativen Verschiebungen zwischen Pile und Sleeve simulieren kann.

Bisher war die Messeinheit nur für die Montage an Grouted Joints fertiggestellter Offshore-Windenergieanlagen vorgesehen. In der Fachwelt werden jedoch auch die Relativbewegungen zwischen Pile und Sleeve während der Erstarrung und Erhärtung des Grout-Materials, dem sogenannten Early-Age Movement (EAM) kritisch diskutiert (Cotardo et al. 2019). Der Einfluss des EAM ist bisher kaum erforscht, jedoch zeigen Untersuchungen, dass welleninduzierte Relativverschiebungen im frühen Alter die Grouteigenschaften beeinträchtigen können (Lohaus et al. 2014). Einschlägige Regelwerke legen fest, während der ersten 24 Stunden der Installationsphase, die Relativverschiebungen zwischen Pile und Sleeve auf maximal 1 mm zu begrenzen (DNVGL-ST-0126). Somit könnte die Messeinheit auch als Monitoring-System für EAM von Grouted Joints unter Wasser eingesetzt werden und messen, ob die geforderten Relativverschiebungen eingehalten werden.

## **DANKSAGUNG**

Die Untersuchungen wurden im Rahmen der Forschungsprojekte GIGAWIND alpha ventus (Förderkennzeichen: 0325032A) und GIGAWIND life (Förderkennzeichen: 0325575A) durchgeführt. Die Forschungsprojekte wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und dem Projektträger Jülich (PtJ) gefördert.

## **LITERATUR**

- Cotardo, D., Haist, M., Lohaus, L. & Begemann, C. (2019): Rotatorische und oszillatorische Scherversuche zur Ermittlung steifigkeitsrelevanter Kenngrößen von Offshore-Vergussmörteln unter dem Einfluss des Early-age Movement, Proceedings of the 28th Conferences and Laboratory Workshops, Regensburg.
- Det Norske Veritas (2018): DNVGL-ST-0126 – Support structures for wind turbines
- Henkel, G., Rau, J. & Henkel, B. (2015): Topographie und Morphologie funktionaler Edelstahloberflächen, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Expert Verlag, Renningen.
- Lohaus, L., Cotardo, D. & Werner, M. (2014): The Early Age Cycling and its Influence on the Properties of hardened Grout Material, Proceedings of the 1st International Wind Energy Conference (IWEC), Hanover, Germany.
- Lohaus, L. & Rzeckowski, P. (2017): SHM-Device for underwater deformation measurement on grouted joints, Poster, GIGAWIND Symposium 2017, Hannover
- Lück, M. (2010): Aufbau druckneutraler, autonomer Unterwasserfahrzeuge für die Tiefsee, PhD thesis.
- Rolfes, R. & Schaumann, P. (2013): Ganzheitliches Dimensionierungskonzept für OWEA-Tragstrukturen anhand von Messungen im Offshore-Testfeld alpha ventus, BMU GIGAWIND alpha ventus, Abschlussbericht, Shaker Verlag, Aachen.
- Rolfes, R., Schaumann, P., Schlurmann, T., Lohaus, L. & Achmus, M. et al. (2018): Lebensdauer-Forschung an den OWEA-Tragstrukturen im Offshore-Testfeld alpha ventus - Validierte Methoden und Strukturmodelle für ein integrales und wirtschaftliches Design von OWEA-Tragstrukturen, GIGAWIND life – Schlussbericht.
- Rzeckowski, P. & Lohaus, L. (2019): SHM-Device for Underwater Deformation Measurements on Grouted Joints, Proceedings of the 29th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Honolulu, USA.
- Schaumann, P., Lochte-Holtgreven, S., Lohaus, L. & Lindschulte, N. (2010): Sinking grouted joints in offshore wind turbines – Bearing behaviour, repair and optimisation, Stahlbau 79, Heft 9, S. 637 – 647, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.