

Grout-WATCH – Untersuchung des Tragverhaltens von Offshore-Grout- Verbindungen unter Wasser an Tragstrukturen mit dynamischen Wechselwirkungen

Abschlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger:

Wölfel Engineering GmbH + Co. KG
Max-Planck-Straße 15
97204 Höchberg

Teilvorhaben: Lifetime-Monitor-Grout

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2020 bis 31.12.2023

Autor: Andreas Nuber, Stavroula Tsiapoki

Höchberg 2024

Das Verbundvorhaben **Grout-WATCH** besteht aus fünf Teilvorhaben:

1. Teilvorhaben: Messdatenbasiertes und modellgestütztes SHM
Zahlungsempfänger: Wölfel Engineering GmbH + Co. KG (**Wölfel**), Höchberg
Förderkennzeichen: 03SX505A
2. Teilvorhaben: Degradationsverlauf mit integrierter FBG-Sensorik und Machine-Learning-
Algorithmen
Zahlungsempfänger: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Beteiligte Institute: Institut für Baustoffe (**IfB**)
Institut für Stahlbau (**IfS**)
Institut für Statik und Dynamik (**ISD**)
Förderkennzeichen: 03SX505B
3. Teilvorhaben: Großmaßstäbliche Modellversuche an Monopile-Tragstrukturen und
numerische Analysen zur Bewertung der messtechnischen Überwachung des
Tragverhaltens von Grout-Verbindungen
Zahlungsempfänger: Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (**IWES**), Hannover
Förderkennzeichen: 03SX505C
4. Teilvorhaben: Strukturelle Integrität von Grout-Verbindungen
Zahlungsempfänger: WindMW Service GmbH (**WindMW**), Bremerhaven
Förderkennzeichen: 03SX505D
5. Teilvorhaben: Faseroptische Sensorik zur Erfassung von Schädigungen im Grout
Zahlungsempfänger: MIOPAS GmbH (**MIOPAS**), Goslar
Förderkennzeichen: 03SX505E

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FKZ 03SX505A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung zu	5
1 Aufgabenstellung	5
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	7
4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	7
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	7
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
II. Eingehende Darstellung zu	8
1 Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	8
1.1 Datenbasis aus dem Windpark Meerwind Süd Ost	8
1.2 SHM im Großversuch	9
1.3 SHM-Methodenentwicklung und Validierung.....	19
1.4 Windparkorientiertes Groutmonitoring in Meerwind Süd Ost.....	30
1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse im Konsortium	35
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	38
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	38
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	38
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	39
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6	39
III. Literaturverzeichnis	39

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Beschleunigung(sensor)
DEL	Damage Equivalent Loads
DMS	Dehnungsmessstreifen (elektrisch)
EMA	Experimentelle Modalanalyse
EOC	Environmental and Operational Conditions
FBG	Faser-Bragg-Gitter
FE / FEM	Finite Elemente / Finite Elemente Methode
GG	Grundbauversuchsgrube
KPI	Key Performace Indicators
MIC	Monitoring Intelligence Center
Modbus TCP	Kommunikationsprotokoll
MP	Monopile
OSS	Offshore Substation (Umspannstation)
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
p-y-Kurve	nichtlineare laterale Federsteifigkeit
Q-z-Kurve	nichtlineare vertikale Steifigkeit an der Pfahlspitze
S3	Amazon S3 (Simple Storage Service)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SF	Spannfeld
SHM	Structural Health Monitoring
TMP	Temperatur(sensor)
TP	Transition Piece
TTH	Testzentrum für Tragstrukturen Hannover
t-z-Kurve	nichtlineare Schaftsteifigkeit
WEA	Windenergieanlage
WEG	Weg(sensor)
WTG	Wind Turbine Generator (Windenergieanlage)
ZE	Zuwendungsempfänger

I. Kurze Darstellung zu

1 Aufgabenstellung

Groutfugen sind nicht nur bei zahlreichen Offshore-Strukturen bewährte Verbindungen zwischen Pfahl und aufgehender Struktur, sondern auch eine Option für die zukünftige Entwicklung. Allerdings gibt es Lastfälle und geometrische Konstellationen, bei denen es zum vorzeitigen Grout-Versagen kommen kann. Deshalb müssen Groutfugen überwacht werden. In einem Vorläuferprojekt QS-M Grout konnte ein Monitoringsystem entwickelt werden, das die Degradation der Groutfuge erkennt und diese von anderen schadhafte Entwicklungen wie z. B. Kolkbildung unterscheiden kann. Allerdings war es bisher nicht möglich, den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu definieren, da dieser nicht beschrieben werden kann und weder eine Methode zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit existierte noch geeignete Sensorik für deren Überprüfung zur Verfügung stand.

Im Projekt Grout-WATCH sollte der Schädigungsprozess solcher Verbindungen für die Offshore-Anwendung untersucht und bewertet werden. Dazu ist ein auf Faser-Bragg-Gitter (FBG) aufbauendes faseroptisches Messsystem zur Integration in die Groutfuge notwendig, um durch kontinuierliches Monitoring Aussagen zur Lebensdauer der Fuge machen zu können.

Im Projekt sollte einerseits der Demonstrator eines solchen Messsystems entwickelt werden. Mit seiner Hilfe sollten die Degradationsvorgänge in der Groutfuge entschlüsselt werden. Andererseits stand der Schädigungsprozess selbst im Mittelpunkt der Forschung. Es wird die Frage nach der Grenztragfähigkeit der Groutverbindung und der verbliebenen Restlebensdauer gestellt. Zu ihrer Beantwortung wurde in einem umfangreichen Versuchsprogramm eine Kennlinie entwickelt, mit der der Grenzzustand beschrieben werden kann.

Aufbauend auf den Messergebnissen der Versuche sollten Methoden und Algorithmen zur strukturellen Beurteilung von Groutfugen entwickelt werden. Sie sollten im Zusammenspiel mit FEM-Simulationen die Grundlage für modellbasierte Monitoringsysteme für Groutfugen bilden.

Schließlich wurden für die Auswertung von Messdaten von vorhandenen Sensoren eines Windparks mit 80 Anlagen neue Methoden des Flottenmonitorings mit Blickrichtung auf das Asset-Management entwickelt. Eine Synthese der beiden Forschungsstränge

- Entwicklung einer neuartigen Sensorkonfiguration auf der Basis von FBG einschließlich Grenzzustands-Kennlinie sowie Entwicklung neuer Auswertemethoden für Groutfugen, die neu hergestellt werden;
- Entwicklung weitergehender Methoden des Populationsmonitorings unter Verwendung der neuen Grenzzustands-Kennlinie für bestehende VergROUTungen auf der Grundlage herkömmlicher Sensorik

war geplant.

Wölfels Schwerpunkt in Grout-WATCH war die Signalanalyse des zukünftigen Monitoringsystems. Dieses System stützt sich auf zwei Komponenten:

- a) Entwicklung von Methoden zum Populationsmonitoring für Altanlagen unter Nutzung vorhandener Sensorik, wie dies z. B. im Windpark Meerwind Süd | Ost der Fall ist.



- b) SHM-System für zukünftige Groutverbindungen, in denen die im Projekt zu entwickelnde neuartige Sensorik verbaut werden kann.

Für beide Komponenten entwickelte Wölfel die Methoden und Algorithmen für die Signalanalyse inklusive der strukturellen Begutachtung (structural assessment). Die Sensorik des neuen SHM-Systems kommt von den Projektpartnern MIOPAS und IfB. Das ISD hat in Ergänzung zu den bei Wölfel entwickelten SHM-Methoden weitere Algorithmen beigesteuert. Von IWES sind besonders Informationen über die Bettung der Gründung eingeflossen.

In Zusammenarbeit mit WindMW sollen die unter a) genannten Arbeiten zu einem Tool für das Asset-Management weiterentwickelt werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Wölfel hat mit dem Projekt Grout-WATCH an das Vorläuferprojekt QS-M Grout angeknüpft. Das in diesem Projekt entwickelte Monitoringsystem für Grout-Verbindungen an Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen war Ausgangspunkt sowohl bezüglich der Hardware als auch bezüglich der Algorithmen für Grout-WATCH.

Eine weitere Voraussetzung für die Durchführung des Projektes war die Möglichkeit, einen Großversuch durchzuführen. Das wichtigste Ziel war die Untersuchung und Bewertung des Schädigungsprozesses einer Grout-Verbindung für die Offshore-Anwendung. Derartige Untersuchungen können nur im Großversuch durchgeführt werden.

Auch der projektbegleitende Ausschuss sollte an dieser Stelle genannt werden. Durch diese Einrichtung werden frühzeitig Anforderungen potenzieller Endanwender in das Projekt eingebunden und die Entwicklungen praxisgerecht durchgeführt.

Mit WindMW, dem Betreiber des Offshore-Windparks Meerwind Süd|Ost war ein potenzieller Endanwender im Konsortium, der selbst auch Forschungsaufgaben bearbeitet hat. Das hat einen weiteren wertvollen Praxisbezug für die Projektarbeit hergestellt.

Insgesamt kann man festhalten, dass sich alle Partner im Konsortium in idealer Weise ergänzt haben. Entsprechend gut war die Zusammenarbeit.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war für die Dauer von 36 Monaten angelegt. Im Projektverlauf traten jedoch einige deutliche Verzögerungen auf. Diese sind teils durch die Corona-Pandemie und deren Folgen, teils durch die Ukraine-Krise und deren Auswirkungen begründet. Die Laufzeit des Projekts wurde deshalb kostenneutral um 10 Monate verlängert. Neben turnusmäßigen Projekttreffen fanden immer wieder auch bilaterale Treffen zwischen einzelnen Projektpartnern statt, z. B. für gemeinsam angelegte Messkampagnen. Durch die Corona-Pandemie fand ein Großteil der Treffen online statt.

Die versuchstechnische Abbildung realer Offshore-Windenergie-Szenarien spielte in *Grout-WATCH* eine entscheidende Rolle. Die geplanten Versuche waren einerseits Erkenntnisquelle für den Schädigungsprozess und die Grenzzustände von Groutfugen und andererseits boten sie die Möglichkeit, alle im Projekt geplanten Neuentwicklungen auf Demonstratorniveau zu testen. Es wurden Versuche im Labormaßstab, an Komponenten und im Großversuch durchgeführt:

- **Laborversuche**
Entwicklung des FBG-Messsystems sowie von Referenzsensoren wie DMS;
 - Versuche bei IfB
 - Beteiligt: MIOPAS, IfB
- **Komponentenversuche**
Tragverhalten von Jacket und Monopile unter axialer Beanspruchung sowie Biegebelastung mittels Prüfmaschine
 - Ermittlung der Grenzzustands-Kennlinie: stabiler Ausgangszustand – Degradation - Progression
 - Erprobung des Messsystems
 - Beteiligt: IfS, IfB, ISD, MIOPAS
- **Großversuch** im TTH, an einem Monopile: Erprobung des SHM-Systems mit integriertem Messsystem unter Berücksichtigung des Bodens; Schädigung plus EOCs: dynamische Biegebelastung zur Degradation, axiale Last für Schädigungszustand (Durchrutschen)
 - Grundbau-Versuchsgrube: dynamische Biegebelastung
 - Spannungsfeld: axiale Last plus Biegebelastung
 - Beteiligt: Wölfel, IWES, ISD, IfS, IfB

Neben den Versuchen wurden Messdaten des Grout-Monitorings aus dem seit 2014 in Betrieb befindlichen Offshore-Windpark Meerwind Süd | Ost auf Windparkebene analysiert.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Wölfel hat mit dem Projekt Grout-WATCH an das Vorläuferprojekt QS-M Grout angeknüpft. Das in diesem Projekt entwickelte Monitoringsystem für Grout-Verbindungen an Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen war Ausgangspunkt sowohl bezüglich der Hardware als auch bezüglich der Algorithmen für Grout-WATCH.

Darüber hinaus wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens benutzt. Lediglich Signalverarbeitungsverfahren, die in der Literatur beschrieben sind, wurden auf die vorhandene Problemstellung angewendet bzw. weiterentwickelt.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Wesentlichen wurde die Fachliteratur über Internetrecherche bezogen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit mit den oben genannten Verbundpartnern, unterstützten die assoziierten Partner PAGEL Spezial-Beton GmbH + Co. KG sowie TenneT TSO GmbH das Projekt.

Darüber hinaus fand am 17.01.2022 ein online-Treffen eines projektbegleitenden Ausschusses mit acht externen Teilnehmern statt. Die Diskussion gab gute Impulse bezüglich der geplanten Versuche sowie zur Relevanz und möglicher späterer Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse. Zum Abschlusstreffen am 20.12.2023 trat der Ausschuss mit einem erweiterten Kreis von 11 externen Teilnehmern erneut zusammen.

II. Eingehende Darstellung zu

1 Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ziel des Forschungsvorhabens Grout-WATCH war die Beschreibung und Beurteilung des Schädigungsvorgangs in Groutfugen, die Ermittlung der Grenztragfähigkeit und eine Prognose der verbleibenden Lebensdauer. Der Schwerpunkt für Wölfel war die Signalanalyse eines zukünftigen Monitoringsystems, welches sich auf zwei Komponenten stützt.

- 1) Entwicklung von Methoden zum Populationsmonitoring für Altanlagen unter Nutzung vorhandener Sensorik, wie dies z. B. im Windpark Meerwind Süd | Ost der Fall ist.
- 2) SHM-System für zukünftige Groutverbindungen, in denen die im Projekt entwickelte neuartige Sensorik verbaut werden kann.

Im Folgenden werden die Arbeiten im Projekt sowie die erzielten Ergebnisse im Detail dargestellt.

1.1 Datenbasis aus dem Windpark Meerwind Süd | Ost

Die Hauptaufgabe von Wölfel zu Beginn des Projekts war die Aufbereitung der Rohdaten der bereits im Offshore Windpark Meerwind Süd | Ost installierten Sensoren zur Vorbereitung des windparkübergreifenden Groutmonitorings. In Zusammenarbeit mit WindMW, dem Projektpartner und Betreiber des Windparks, konnten die Rohdaten aufbereitet werden. Der Windpark Meerwind Süd | Ost besteht aus 80 Anlagen. Alle Anlagen sind mit einem Grout-Gap-Monitoring-System ausgerüstet, welches Wegsensoren am Transition Piece umfasst. An acht der 80 Anlagen ist zusätzlich ein Monitoring System für die Gründungsstrukturen installiert, welches die Erfassung von Dehnungs-, Neigungs- und Beschleunigungssignalen am Turm und Transition Piece umfasst. Die Betriebs- und Umgebungsbedingungen sind ebenfalls für alle Anlagen vorhanden (SCADA Daten).

Vor Projektstart wurden die Daten der zwei Monitoring-System-Typen zwar gespeichert, aber weder zusammengeführt noch synchronisiert. Im Rahmen des Projekts Grout-WATCH wurde ein Server zur Datenanalyse (SHM-Server) im März 2021 auf der Umspannstation (OSS) des Windparks installiert. Auf dem Server sollten die Prozesse und Algorithmen zur Zusammenführung, Synchronisation und Vorverarbeitung der Daten ausgeführt werden. Für die Durchführung von Arbeiten auf dem Server wurde für Wölfel ein Zugriff auf das Netzwerk des Windparks konfiguriert. Die Verbindung zum Windparknetzwerk und anschließend auf dem Server wurde Ende Mai 2021 hergestellt und erfolgreich getestet. Darüber hinaus wurde eine Schnittstelle zwischen dem SHM-Server und dem SCADA System implementiert. Als Kommunikationsprotokoll wurde Modbus TCP verwendet. Diese Schnittstelle dient zur Übertragung der Betriebs- und Umgebungsdaten der 80 Anlagen zum SHM-Server. Die Implementierung der SCADA Schnittstelle wurde in der zweiten Jahreshälfte des Jahres 2022 abgeschlossen.

Die Übermittlung der Daten aus den Monitoring-Systemen der acht Anlagen und der Daten der 80 Grout-Gap-Monitoring-Systeme sowie der Betriebs- und Umgebungsdaten auf den SHM-Server wurde erfolgreich implementiert. Die Datenstruktur, d.h., die Kanalnamen und -Beschreibungen sowie die entsprechenden Einheiten und Sensorpositionen wurden dokumentiert. Die Rohdaten werden auf einem S3 Storage in derCloud gespeichert. Ein Zugriff auf die Daten wurde für die Projektpartner WindMW und ISD konfiguriert.

Die Daten der 80 Grout-Gap-Monitoring-Systeme umfassen statistische Werte. Diese wurden nicht weiterverarbeitet, sondern in eine Datenbank übertragen und auf einem Webportal visualisiert (MIC: Monitoring Intelligence Center). Für die acht Anlagen mit zusätzlicher Sensorik wurden die Daten der Fundament-Monitoring-Systeme mit den Betriebs- und Umgebungsbedingungen synchronisiert und analysiert. Die durchgeführten Analysen umfassten die Ermittlung von statistischen Werten, die Identifikation der modalen Parameter und die Schätzung von Lasten an der Groutverbindung (siehe Ergebnisse in Kapitel 1.4).

Der implementierte Datenfluss im Windpark Meerwind Süd | Ost wird in Abbildung 1 dargestellt.

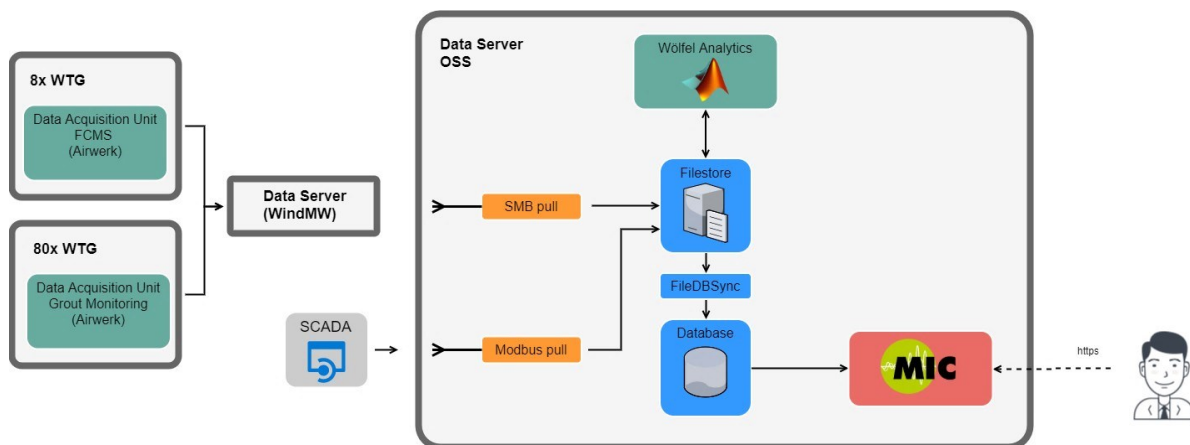


Abbildung 1: Datenfluss zwischen den Monitoring-Systemen und dem Server im Offshore Windpark Meerwind Süd / Ost und Prozesse zur Datenübermittlung, -Analyse und -Visualisierung.

1.2 SHM im Großversuch

1.2.1 Zielsetzung

Im Vorgängerprojekt QS-M Grout konnte Wölfel anhand der Versuche im Testzentrum für Tragstrukturen (TTH) zeigen, dass die Schadensdetektion an Groutfugen mittels globaler SHM-Verfahren möglich ist. Im Projekt Grout-WATCH hat Wölfel den Großversuch im TTH in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern geplant und die Messungen begleitet. Die Ziele von Wölfel im Großversuch können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Beschreibung des Schädigungsentwicklungsprozesses an der Groutfuge anhand verschiedener Sensortechnologien und Schadensindikatoren.
- Beantwortung der Frage „Wann gilt eine Groutfuge als beschädigt?“.
- Bestimmung des Einflusses der Schädigung an der Groutfuge auf das Tragverhalten der Struktur.

Heutzutage umfassen die Strukturüberwachungssysteme von Offshore Windenergieanlagen (OWEA) hauptsächlich Beschleunigungs- und Neigungssensoren, sowie Dehnungsmessstreifen (siehe VDI-Richtlinie 4551 [1]). Diese Sensorkonfiguration ermöglicht die Strukturüberwachung auf globaler Ebene sowie die lokale Erfassung von Lasten an kritischen Ebenen. Windenergieanlagen (WEA) mit einer Grout-Verbindung sind in der Regel mit drei Wegsensoren an der Grout-Fuge zusätzlich ausgerüstet.

Aus diesem Grund hat Wölfel eine Sensorkonfiguration ausgewählt mit Sensoren, die Bestandteil eines typischen Überwachungssystems einer OWEA sind (z. B. Beschleunigungssensoren entlang der Struktur sowie Dehnungs- und Wegsensoren an der Grout-Verbindung). Die extrahierten Ergebnisse wurden mit anderen Sensordaten kombiniert und korreliert, die typischerweise in Offshore-Installationen nicht erfasst werden, aber signifikante Zusatzinformationen über die lokale Schädigungsentwicklung liefern (z. B. FBG-Sensoren von MIOPAS im Groutmaterial). Dementsprechend konnten sowohl lokale als auch globale Schadensindikatoren untersucht und verglichen werden.

1.2.2 Testaufbau und Versuchsablauf

Die Groutverbindungen von OWEA werden hauptsächlich unter Biegung beansprucht. Ein Ermüdungsversuch unter Biegebeanspruchung wurde daher an einem großmaßstäblichen Modell einer Monopile-Tragstruktur im TTH durchgeführt, um die Schädigungsentwicklung an einer Groutfuge für diesen Lastfall zu untersuchen. Der Versuchskörper bestand aus drei Teilen, die mit zwei Flanschverbindungen miteinander verbunden sind: dem Turm, dem Transition Piece (TP), welcher die Groutverbindung beinhaltet, und dem Pfahl (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Im Spannungsfeld wurden nur der Turm und Transition Piece getestet, während der Pfahl nur bei den Messungen in der Grundbaugrube im Einsatz war. Zwei Transition-Pieces wurden gefertigt und getestet.

Der Sensoraufbau wird auf dem oberen, linken Bild von **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die Sensorpositionen werden ebenfalls auf dem 3D-Modell des Versuchskörpers, welches durch IWES erstellt wurde [2], angezeigt (Bild oben rechts in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Eine Detailansicht der Sensorpositionen am TP ist im unteren Bild derselben Abbildung gezeigt.

- Beschleunigung wurde auf drei Ebenen entlang des Turmes, auf zwei Ebenen des TPs (einmal oberhalb und einmal unterhalb der Groutfuge) und am Shaker erfasst.
- Drei Wegsensoren haben die relative vertikale Verschiebung an der Unterkante des Sleeves gemessen.
- Faseroptische Dehnungssensoren wurden insgesamt auf 10 Ebenen entlang des TPs bei 0° und 180° installiert. Acht Ebenen um die Schubrippen wurden äquidistant ausgerüstet (siehe Ebenen L04 bis L11). Zwei Ebenen, einmal oberhalb und einmal unterhalb der Schubrippen, wurden ebenfalls ausgerüstet (siehe Ebenen L02 und L12)
- Konventionelle, elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS) haben die Dehnung auf drei Ebenen des TPs gemessen. Auf den Ebenen L01 und L12, welche jeweils unterhalb und oberhalb der Schubrippen liegen, wurden jeweils vier DMS um den Umfang installiert. Auf der Ebene L08, welche in der Mitte der Schubrippe liegt, wurden zwei DMS um den Umfang installiert. Die letzteren dienen zur Validierung der Messung des faseroptischen Sensors auf derselben Ebene und zum Vergleich der zwei Sensortechnologien.
- Temperaturmessung hat am oberen Teil des TPs, auf Ebene L14, stattgefunden.

Der Versuchsablauf für die zwei Transition-Pieces wird in Tabelle 1 dargestellt. In beiden Fällen wurde zuerst im Spannungsfeld eine Rampe mit bekannter Verschiebung zur Kalibrierung der Sensoren gefahren. Anschließend wurde eine Referenzmessung mit Shakeranregung im unbeschädigten Zustand sowohl in der Grundbaugrube als auch im Spannungsfeld durchgeführt. Diese umfasste Rauschanregung, einen Sweep und eine Sinusanregung. Bei TP1 wurden insgesamt acht Stufen von Wechsellasten bis zur Schädigung

gefahren. Nach Abschluss jeder Stufe wurde eine Messung unter Shakeranregung und eine Messung im Stillstand durchgeführt. Nach der Schädigung der Groutfuge wurde erneut eine Messung in der Grundbaugrube durchgeführt.

Der Versuchsablaufplan des TP2 unterscheidet sich von dem des TP1 darin, dass die zweite Messung in der Grundbaugrube nicht nach der Schädigung, sondern nach der 4. Stufe durchgeführt wurde.

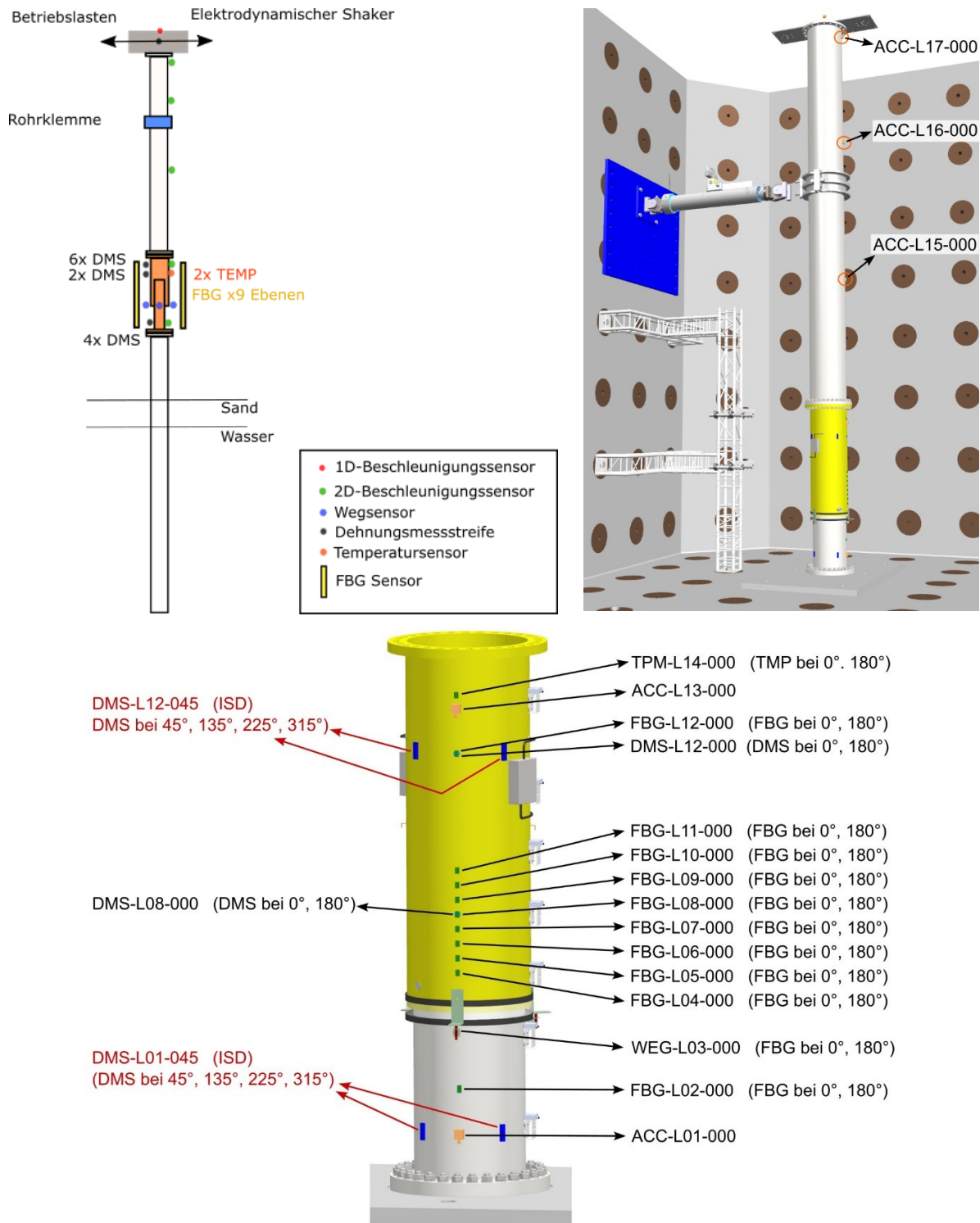


Abbildung 2: Übersicht des Sensoraufbaus (oben links). Sensorpositionen auf dem IWES Modell [2] des Versuchskörpers (oben rechts). Detaillierte Ansicht der Sensorpositionen am TP (unten).

Tabelle 1: Versuchsablauf für TP1 und TP2.

TP 1				TP 2			
Tag	Datum	Ort	Anregung/ Beschreibung	Tag	Datum	Ort	Anregung/ Beschreibung
1	12.05.2023	SF	Testmessung Rampe ±2mm	1	27.06.2023	SF	Testmessung Rampe ±2mm
2	17.05.2023	GG	Referenzmessung Shaker (Rauschen, Sweep, Sinus, Stillstand)	2	29.06.2023	GG	Referenzmessung Shaker
3	23.05.2023	SF	Referenzmessung Shaker (Rauschen, Sweep, Stillstand)	3	04.07.2023	SF	Referenzmessung Shaker
4	24.05.2023	SF	Stufe 01: 15mm (25kN) & Shaker	4	05-06.07.2023	SF	Stufe 01: 15mm (25kN) & Shaker
5	25.05.2023	SF	Stufe 02: 30mm (50kN) & Shaker	5	06.07.2023	SF	Stufe 02: 30mm (50kN) & Shaker
6	30.05.2023	SF	Stufe 03: 45mm (75kN) & Shaker	6	10.-11.07.2023	SF	Stufe 03: 45mm (75kN) & Shaker
7	01.06.2023	SF	Stufe 04: 60mm (95kN) & Shaker	7	11.-12.07.2023	SF	Stufe 04: 60mm (95kN) & Shaker
8	05.06.2023	SF	Stufe 05: 62.5mm (98.5kN) & Shaker	8	13.07.2023	GG	Referenzmessung Grube
9	06.06.2023	SF	Stufe 06: 65mm (102kN) & Shaker	9	07.08.2023	SF	Referenzmessung Spannfeld
10	07.06.2023	SF	Stufe 07: 67.5mm (105kN) & Shaker	10	08.08.2023	SF	Stufe 05: 62.5mm (98.5kN) & Shaker
11	08.06.2023	SF	Stufe 08: 70mm (107.5kN) & Shaker	11	09.08.2023	SF	Stufe 06: 65mm (102kN) & Shaker
12	19.06.2023	GG	Messung Shaker (Rauschen, Sweep, Stillstand)	12	10.08.2023	SF	Stufe 07: 67.5mm (105kN) & Shaker
				13	26.09.2023	SF	Stufe 08: 70mm (107.5kN) & Shaker

1.2.3 Schadensindikatoren und Ergebnisse

1.2.3.1 Wellenlängen der MIOPAS FBG Sensoren

Die Dehnung im Groutmaterial wurde durch die faseroptischen Sensoren von MIOPAS erfasst, welche die Wellenlänge des vom Bragg-Gitter reflektierten Lichts als Messgröße liefern. Wie bei herkömmlichen FBG-Sensoren führen Änderungen der Dehnung im Material zu einer Änderung der gemessenen Wellenlänge. Der Verlauf der gemessenen Wellenlängen wurde als Indikator für die Entwicklung der Dehnung und damit für die Entstehung von Rissen im Mörtel verwendet. Ausgewertet wurden die Sensordaten während der zyklischen Belastung.

Die gemessenen Signale während der zyklischen Belastung wurden über die Zeit aufgezeichnet. Änderungen der Amplitude und des Mittelwerts des Signals (z. B. Drifts) wurden als Indikator für die Umverteilung der Dehnungen und die Entwicklung der Risse verwendet. Der Schweregrad dieser Veränderungen wurde in vier Kategorien eingeteilt:

- 0: keine signifikanten Dehnungsänderungen
- 1: kleine Dehnungsänderungen
- 2: deutliche Dehnungsänderungen
- 3: starke Dehnungsänderungen

Die Ergebnisse aller acht Sensoren und Laststufen des Ermüdungsversuchs am TP1 sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Anordnung der acht Sensoren in der Grout-Fuge wird in *Abbildung 3* dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schädigungsentwicklung von 0° bzw. 180° zu 90° bzw. 270°, d.h. von der Belastungsrichtung zu senkrecht zur Belastungsrichtung stattfindet. Dies stimmt mit der erwarteten Schädigungsentwicklung überein und zeigt, dass die MIOPAS Sensoren zuverlässig die Lage und Intensität der Schädigung ermitteln können. Ab Stufe 5 liefern einige Sensoren graduell keine Daten mehr. Dies entspricht einem Sensorverlust bzw. ist ein Hinweis darauf, dass das Material stark beschädigt wurde.

Tabelle 2: Wellenlängenänderungen der acht FBG-Sensoren während des Ermüdungsversuchs von TP1. 0: keine signifikanten Änderungen, 1: kleine Dehnungsänderungen, 2: deutliche Dehnungsänderungen, 3: starke Dehnungsänderungen, keine Angabe: Der Sensor liefert keine Daten mehr.

Sensor	24.05.2023 Stufe 01 (25kN)	25.05.2023 Stufe 02 (50kN)	30.05.2023 Stufe 03 (75kN)	01.06.2023 Stufe 04 (95kN)	05.06.2023 Stufe 05 (98.5kN)	06.06.2023 Stufe 06 (102kN)	07.06.2023 Stufe 07 (105kN)	08.06.2023 Stufe 08 (107.5kN)
1	1	1	2	3	-	-	-	-
2	0	0	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	1	3	2	3	-
5	0	1	2	2	-	-	-	-
6	0	1	2	3	-	3	-	-
7	0	0	0	0	-	0	0	0
8	1	1	2	0	-	0	0	0

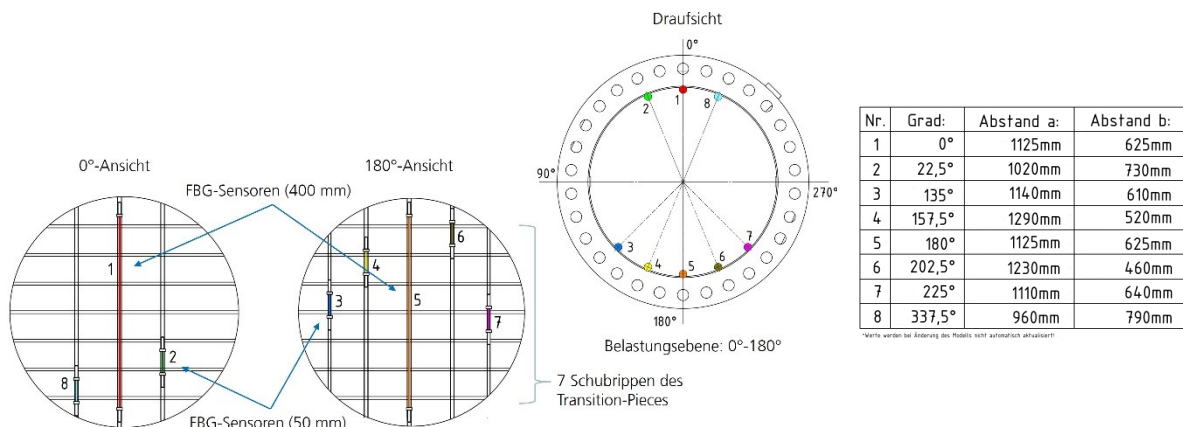


Abbildung 3: Anordnung der FBG Sensoren von MIOPAS in der Grout-Fuge [3]. Abstand a: Abstand der Unterkante Pile bis Sensormitte Abstand b: Sensormitte bis Ösenmitte (obere Halterung) [siehe: Schlussbericht Teilvorhaben IWES].

1.2.3.2 Vertikale Verschiebung an der Groutfuge

Drei Wegsensoren wurden in gleichen Abständen von 120° um den Umfang der Groutfuge zur Messung der relativen vertikalen Verschiebung zwischen dem oberen Pile und der Sleeve-Unterkante installiert. Die Messwerte der drei Positionen wurden zur Ermittlung der Schiefstellung der Grout-Verbindung kombiniert. Ausgewertet wurden die Stillstandsmessungen nach jeder Belastungsstufe.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Boxplots dargestellt. Boxplots dienen allgemein zur Darstellung von Verteilungen und statistischen Werten, wie z. B. das 0.25-, 0.5- und 0.75-Quantil, den Mittelwert und die Standardabweichung sowie Ausreißer. Der untere und der obere Teil der Box stellen das 0.25- und das 0.75-Quantil dar. Die horizontale Linie in der Box stellt den Median (0.5-Quantil) dar. Die

Höchst- und Mindestwerte, die keine Ausreißer sind, werden durch die Whisker dargestellt. Ausreißer werden auch über oder unter den Maximal- und Minimalwerten angezeigt.

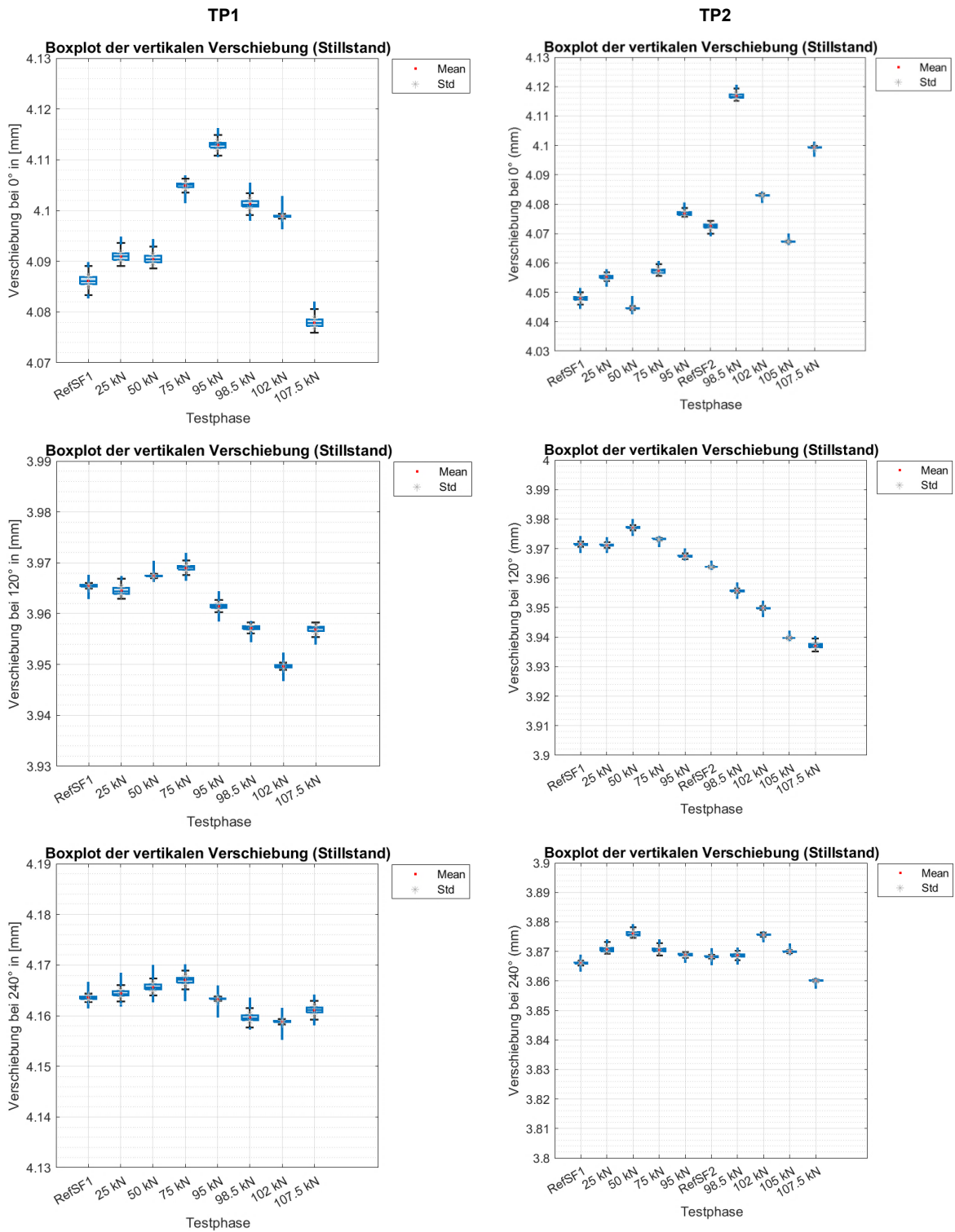


Abbildung 4: Vertikale Verschiebung an der Unterkante der Groutfuge bei 0° (obere Reihe), 120° (mittlere Reihe) und 240° (untere Reihe) während der Stillstandmessungen nach jeder Belastungsstufe (TP1 links und TP2 rechts)

Abbildung 4 zeigt die Boxplots der vertikalen Verschiebung an der Unterkante der Groutfuge im Stillstand nach jeder Belastungsstufe. Die erste und zweite Spalte enthält jeweils die Ergebnisse für TP1 und TP2. Reihenweise werden die Ergebnisse der drei Sensorpositionen, d.h. 0°, 120°, 240° dargestellt.

Die relative Verschiebung gibt im Gegensatz dazu den Unterschied zwischen der maximalen und minimalen Verschiebung der jeweiligen drei Messpositionen an. Abbildung 5 zeigt die relative Verschiebung zwischen den drei Sensorpositionen.

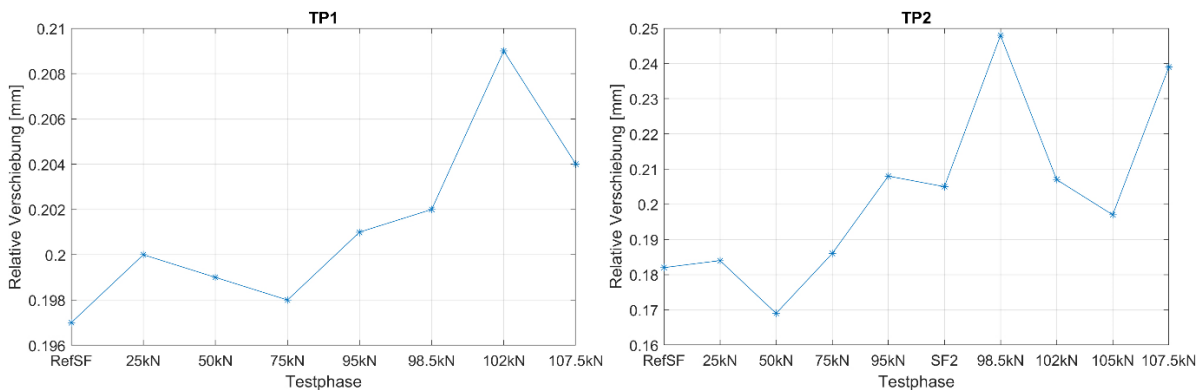


Abbildung 5: Relative Verschiebung an TP1 und TP2.

Die absolute Verschiebung bei 0° und 120° ist vergleichbar zwischen den zwei Versuchen. Bei 240° weichen die absoluten Werte zwischen den beiden TP leicht ab. Die relative Schiefstellung beträgt 0,168 mm bis 0,25 mm. Höhere Werte werden ab Stufe 4 von 8 (95 kN bzw. 60 mm) gemessen. Die Richtung der Schiefstellung am Ende des Ermüdungsversuchs liegt bei 120° für TP1 bzw. 180° TP2. Die Richtung der Schiefstellung ändert sich nur wenig während des Versuchs.

1.2.3.3 Steifigkeitsverlust an der Groutfuge

Die Dehnung wurde entlang, oberhalb und unterhalb der Groutfuge gemessen. Das Verhältnis zwischen der Varianz der Zylinderkraft und der Varianz der Dehnung wurde berechnet, um die Dehnungsverteilung und den Steifigkeitsverlust entlang der Grout-Verbindung nach jeder Laststufe zu bewerten. Ausgewertet wurden die Daten aus der Belastung mit 10 Zyklen bei 0,01 Hz, welche nach jeder Laststufe durchgeführt wurden.

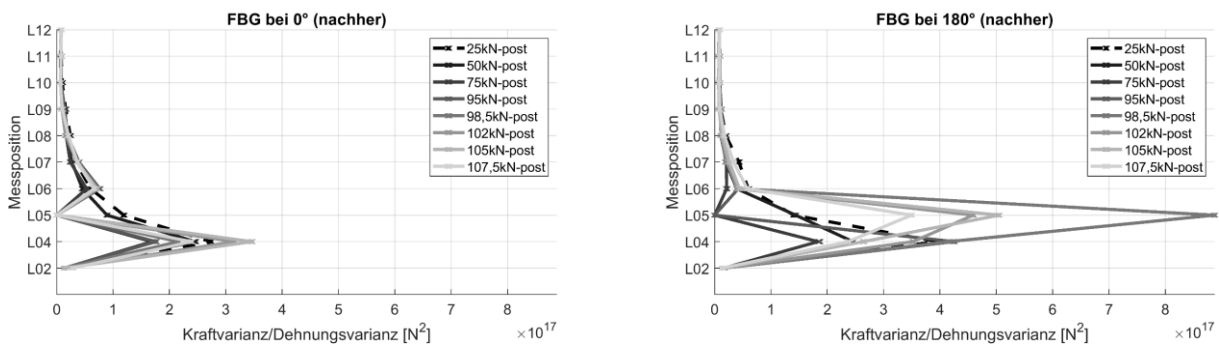


Abbildung 6: Verhältnis der Varianzen von Zylinderkraft und Dehnung auf Basis der Daten der Belastung mit 10 Zyklen bei 0,01 Hz, welche nach jeder Laststufe durchgeführt wurden. Dargestellt sind die Ergebnisse der FBG-Stränge bei 0° (links) und bei 180° (rechts) nach jeder Laststufe. Ebene L02 befindet sich unterhalb und L12 oberhalb der Grout-Fuge. Ebenen L04 bis L10 sind äquidistant und befinden sich um die Schubrippen.

In Abbildung 6 werden die Ergebnisse dieser Auswertung für die FBG-Stränge bei 0° und 180° dargestellt. Die vertikale Achse entspricht den Messpositionen entlang der Groutfuge und die horizontale Achse dem ausgewählten Indikator.

Höhere Werte des Verhältnisses sind auf einen Steifigkeitsverlust zurückzuführen. Ein Steifigkeitsverlust liegt hauptsächlich im unteren (siehe L04) aber auch in kleinerem Maß im oberen Bereich (siehe L06) der Fuge vor. Umlagerungen sind bereits nach der ersten Laststufe erkennbar. Der Steifigkeitsverlust ist höher auf der 180°-Seite.

1.2.3.4 Globale Steifigkeit

Die globale Steifigkeit der Struktur wird durch die Eigenfrequenzen beschrieben. Experimentelle Modalanalyse (EMA) wurde auf die Daten der Shaker-Rauschanregung, welche nach jeder Belastungsstufe durchgeführt wurde, zur Ermittlung der Eigenfrequenzen angewendet. Verfahren der EMA setzen voraus, dass die Anregungskraft bekannt ist. Zur Berechnung der Anregungskraft wurde die Shakermasse mit der Shaker-Beschleunigung multipliziert. Die Shaker-Beschleunigung wurde durch einen einaxialen Sensor direkt an der Sheakermasse gemessen. Die Anregungskraft diente als Input und die Beschleunigung entlang der Struktur als Output in der EMA zur Bestimmung der Übertragungsfunktion des Systems. In Abbildung 7 werden die Übertragungsfunktionen von allen Laststufen nebeneinander beispielhaft dargestellt. Die dargestellten Übertragungsfunktionen wurden zwischen der Anregungskraft und dem Beschleunigungssensor von Ebene 17 gebildet. Die horizontale Achse der Abbildung wurde auf ca. 60 Hz begrenzt, damit die Verschiebung der Eigenfrequenz während des Versuchs besser zu erkennen ist.

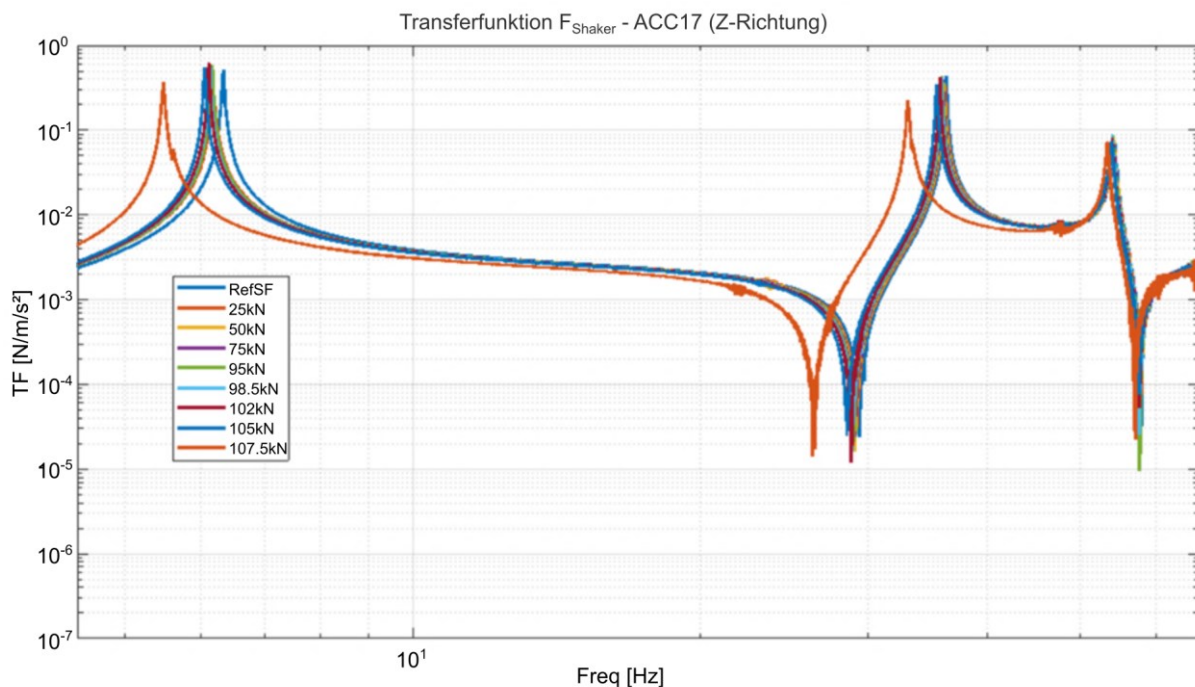


Abbildung 7: Übertragungsfunktionen im Bereich bis ca. 60 Hz.

Die erste, zweite und dritte Eigenfrequenz wurde mittels Peak-Picking identifiziert. Die Abweichung der drei ersten Eigenfrequenzen vom Referenzwert des unbeschädigten Zustands wird in Abbildung 8 für die Belastungstests an den zwei TP dargestellt (linke Spalte: TP1, rechte Spalte TP2).

Für beide TP liegt eine signifikante Senkung der ersten Eigenfrequenz direkt nach der ersten Laststufe vor. Diese entspricht dem ‚Einsetzen‘ des Systems. Eine weitere erhebliche Abnahme der ersten und zweiten Eigenfrequenz, die größer als 2 % ist, erfolgt ab Laststufe 6 (d.h. ab 102 kN bzw. 65 mm).

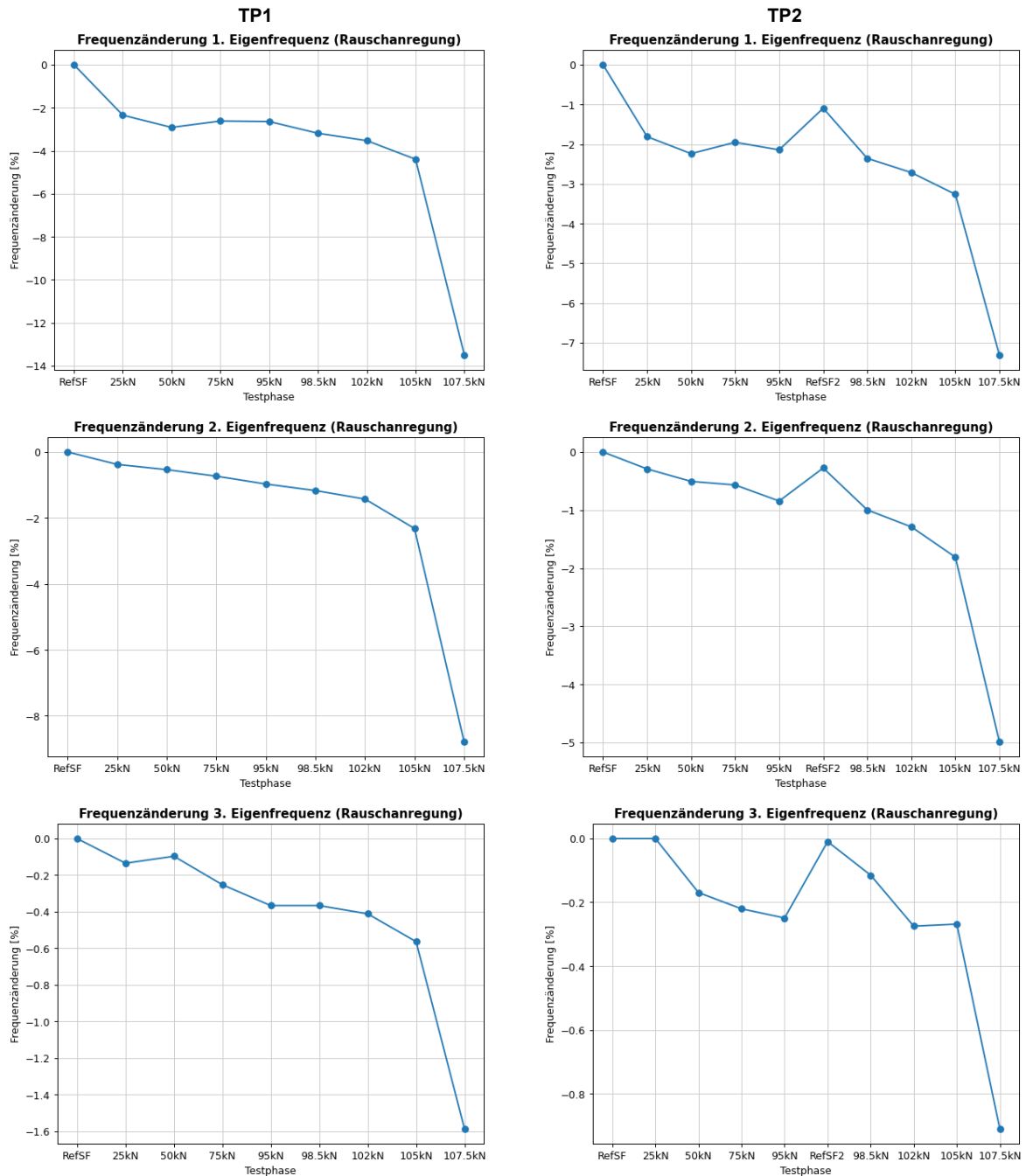


Abbildung 8: Veränderung der drei ersten Eigenfrequenzen während des Großversuchs (links: TP1, rechts: TP2).

Beim zweiten TP gab es eine Belastungspause von vier Wochen nach der Belastung bei 95 kN. Im Anschluss wurde eine zweite Referenzmessung vor jeder Belastung durchgeführt. Die Ergebnisse der zweiten Referenzmessung zeigen, dass die drei ersten Eigenfrequenzen nach der langen Belastungspause gestiegen sind und dass ihre Werte sogar höher sind als die der ersten Belastungsstufe. Dies deutet auf eine „Erholung“ der Groutfuge nach Belastungspausen hin.

Das wichtigste Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass interne Risse an der Groutfuge, die bereits in frühen Phasen des Versuchs auftreten, die globale Steifigkeit und die Tragfähigkeit des Bauwerks nicht beeinträchtigen. Die globale Steifigkeit wird erst zu einem späteren Zeitpunkt beeinflusst, wenn die gesamte Groutfuge ermüdet ist.

1.2.3.5 Zusammenfassung

Mit den Ergebnissen des Großversuchs können folgende Aussagen untermauert werden:

- Das frühzeitige Erkennen von rissbedingten Veränderungen im Dehnungsverhalten im Grout ist mittels FBG-Sensoren möglich. Darüber hinaus lässt sich die zeitliche und räumliche Ausprägung von Schädigungsvorgängen ableiten.
- Die vertikale Verschiebung tritt anfänglich bei 240° bzw. 120° auf und anschließend in der Hauptbelastungsrichtung bei 0°. Am Ende des Versuches kann eine permanente Schiefstellung in Richtung 180° nachgewiesen werden.
- Eine signifikante Senkung der ersten Eigenfrequenz findet direkt nach der ersten Laststufe statt. Diese entspricht dem ‚Einsetzen‘ des Systems. Eine weitere erhebliche Abnahme der ersten und zweiten Eigenfrequenz erfolgt ab Laststufe 6.
- Die integrierten FBG-Sensoren sind in der Lage, Risse zu identifizieren, bevor sich eine durch nichtlineares Strukturverhalten geänderte Tragfähigkeit beobachten lässt.
- Bei 180° entstehen höhere Dehnungen als bei 0°. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vertikalen Verschiebungen. Die Ebenen L04 und L05 werden stärker belastet als die übrigen Ebenen.

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse für die untersuchten Merkmale zusammengefasst. Dies umfasst die Detektionsmöglichkeiten für jedes Merkmal, die Ergebnisse des Versuches sowie die Verfügbarkeit der entsprechenden Sensorik bzw. KPI im realen, offshore Feld.

Merkmal	Verfügbarkeit Offshore	Detektionsmöglichkeiten	Ergebnisse
Änderung der Wellenlänge in FBG-Sensoren im Groutmaterial	i.d.R. nicht vorhanden	Auftreten von Rissen. Lokalisation von Schädigungen.	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Veränderung der Wellenlänge ab Stufe 1/8. - Signifikante Erhöhung der Dehnung ab Stufe 3/8 (75 kN bzw. 45 mm). - Sensorverlust ab Stufe 6/8 (102 kN bzw. 65 mm). - Schädigungsentwicklung von 0°/180° zu 90°/270°
Dehnung entlang der Fuge (außen)	i.d.R. nicht vorhanden	Lokalisation von Schäden in Ebenen (und Richtung) mit Veränderung der Dehnung	<ul style="list-style-type: none"> - Steifigkeitsverlust im oberen und unteren Bereich der Groutfuge - Umlagerungen erkennbar sogar nach der ersten Laststufe - Steifigkeitsverlust höher auf 180°-Seite
Vertikale Verschiebung	Vorhanden	Bleibende Verschiebung, Identifikation der Richtung globaler Schädigung	<ul style="list-style-type: none"> - Schiefstellung Richtung 120° (TP1) bzw. 180° (TP2).

			<ul style="list-style-type: none"> - Die Richtung der Schiefstellung ändert sich nur leicht während des Versuches. - Relative Schiefstellung von 0.168 mm - 0.25 mm (TP2). - Höhere Werte ab Stufe 4/8 (95 kN bzw. 60 mm).
Globale Steifigkeit	Vorhanden	Veränderung der globalen Steifigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Die globale Steifigkeit der Struktur wird erst bei einer maßgeblichen Schädigung beeinflusst. - Signifikante Reduktion der EF (> 2%) erst ab Stufe 6/8 (102 kN bzw. 65 mm). - „Erholung“ der Groutfuge nach Belastungspause.

1.3 SHM-Methodenentwicklung und Validierung

1.3.1 Zielsetzung

Ziel der durchgeführten Arbeiten war die Entwicklung von SHM-Methoden zur Überwachung der Groutverbindung bei realen, maßstäblichen OWEA. Die Arbeiten wurden in zwei Teile gegliedert. Der erste Teil umfasst modellgestützte Untersuchungen und der zweite Teil umfasste die Methodenentwicklung zur zuverlässigen Ermittlung von Lasten an der Groutverbindung.

Die modellgestützten Untersuchungen zielten darauf ab, Aufschluss über die Auswirkung von Schäden in Groutfugen auf Key-Performane-Indikatoren (KPI), die typischerweise im SHM von Offshore-Windparks berücksichtigt werden (wie z. B. die Struktur-Eigenfrequenzen), zu liefern. Zu diesem Zweck hat der Projektpartner WindMW Design- und Geometriedaten einer repräsentativen Windenergieanlage des Windparks Meerwind Süd | Ost Wölfel zur Verfügung gestellt. Wölfel hat auf Basis dessen ein FE-Modell erstellt und den Einfluss von verschiedenen Schadensszenarien auf die erste Eigenfrequenz untersucht.

Die Entwicklung von SHM-Methoden fand anhand von Daten eines anderen Offshore Windparks statt, da die Anbindung an die Daten von Meerwind Süd | Ost zu diesem Zeitpunkt noch nicht realisiert war. Der Fokus lag auf der Entwicklung von Verfahren zur indirekten Messung bzw. Schätzung von Lasten sowie des Ermüdungslebensdauer verbrauchs an der Groutverbindung. Dieser Ansatz ist auf Anlagen mit einer konventionellen Flanschverbindung zwischen Turm und Transition-Piece übertragbar.

1.3.2 Modellgestützte Untersuchungen

Anlage M07 wurde von WindMW als repräsentativ für die Erstellung des FE-Modells ausgewählt. Zwei Modelle wurden erstellt. In beiden Fällen besteht das Modell, welches in Abbildung 9 angezeigt wird, aus drei Turmsegmenten, dem Transition Piece, dem Bereich der Groutverbindung und der Monopile-Struktur.

- Im ersten Modell wurde die Groutverbindung vereinfacht durch Ersatzbalkenelemente simuliert. Alle anderen Komponenten der Windenergieanlage wurden ebenfalls durch Balkenelemente simuliert. Verwendung fand das vereinfachte Modell zur Ermittlung der

globalen Steifigkeit der Struktur, welche für die Lastrekonstruktion im Windpark Meerwind Süd | Ost erforderlich war (siehe Kapitel 1.4.3).

- Im zweiten Modell wurden die Stahlteile des Transition-Pieces und Monopiles durch Schalenelemente und das Grout durch Volumenelemente simuliert. Diese Konfiguration erlaubte die Simulation von Schädigungsszenarien und folglich das Durchführen einer Sensitivitätsanalyse.

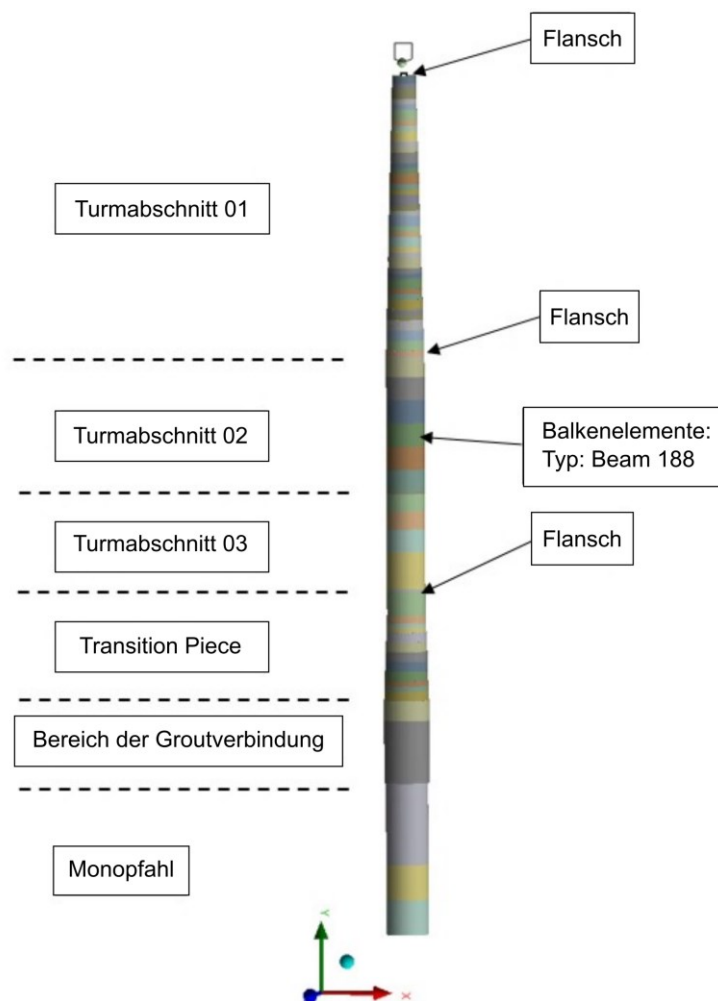


Abbildung 9: FE-Modell der MO07

Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Einflusses von verschiedenen Schadensszenarien auf die erste Eigenfrequenz wurde anhand des detaillierteren Modells durchgeführt. Folgende Schadensszenarien wurden für die Groutverbindung modelliert:

- Horizontale Schädigung um den ganzen Umfang
 - Schädigung ober- und unterhalb der Shear Keys
 - Schädigung ober- und unterhalb der Shear Keys sowie an 4, 8, 12, 14 Shear Keys
- Vertikale Schädigung
 - Ausschnitt (Cut-out) von 10° bis 90° in Schritten von 10° auf der Vorder- und Rückseite

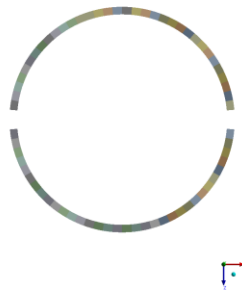


Abbildung 10: Segment der Groutfuge mit einem Ausschnitt von 10° auf der Vorder- und Rückseite.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in *Tabelle 3* zusammengefasst. Sowohl die horizontale als auch die vertikale Schädigung haben einen erheblichen Einfluss auf die erste Eigenfrequenz der Struktur. Die anfängliche horizontale Schädigung (ober- und unterhalb der Shear Keys) verursacht eine größere Veränderung der Eigenfrequenzen als die anfängliche vertikale Schädigung (10° auf der Vorder- und Hinterseite). Allerdings führt das zusätzliche Versagen an Shear Keys zu kleineren Veränderungen als die Vergrößerung des ausgeschnittenen Segments. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Eigenfrequenzen ein geeigneter Indikator für die Erkennung von erheblichen Schäden im Grout sind.

Tabelle 3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für verschiedene Schadensszenarien an der Groutverbindung.

Schädigungstyp	Beschreibung	Erste Eigenfrequenz [Hz]	Abweichung [%]
Unbeschädigtes Grout	-	0,30026	-
Horizontale Schädigung	Ober- und unterhalb der Shear Keys	0,29639	1,3%
	Ober- und unterhalb der Shear Keys und an 4 zusätzlichen Shear Keys	0,29549	1,6%
	Ober- und unterhalb der Shear Keys und an 8 zusätzlichen Shear Keys	0,29456	1,9%
	Ober- und unterhalb der Shear Keys und an 12 zusätzlichen Shear Keys	0,29284	2,5%
	Ober- und unterhalb der Shear Keys und an 14 zusätzlichen Shear Keys	0,289190	3,7%
Vertikale Schädigung	Grout-Ausschnitt von 10° auf Vorder- und Rückseite	0,29864	0,5%
	Grout-Ausschnitt von 20° auf Vorder- und Rückseite	0,29553	1,6%
	Grout-Ausschnitt von 30° auf Vorder- und Rückseite	0,28834	4,0%
	Grout-Ausschnitt von 40° auf Vorder- und Rückseite	0,26259	12,5%
	Grout-Ausschnitt von 50° auf Vorder- und Rückseite	0,23262	22,5%
	Grout-Ausschnitt von 60° auf Vorder- und Rückseite	0,19608	34,7%
	Grout-Ausschnitt von 70° auf Vorder- und Rückseite	0,15934	46,9%
	Grout-Ausschnitt von 80° auf Vorder- und Rückseite	0,12706	57,5%
	Grout-Ausschnitt von 90° auf Vorder- und Rückseite	0,10086	66,4%

In der Simulation hat die horizontale Schädigung oberhalb und unterhalb der Shear Keys eine Veränderung der ersten Eigenfrequenz von 1,3 % verursacht, während die erste Stufe der vertikalen Schädigung, d.h. der Grout-Ausschnitt von 10° auf der Vorder- und Rückseite, zu einer Veränderung von 0,5 % führte. Im Großversuch hingegen ist direkt nach der ersten Belastungsstufe eine Veränderung von 2,2 % bei TP1 bzw. 1,8 % bei TP1 durch das „Einsetzen“ des Systems entstanden. Bei den darauffolgenden Laststufen bis 98,5 kN wurde eine zusätzliche Veränderung von ca. 1 % beobachtet. Erst ab der Laststufe mit 102 kN hat die zusätzliche Veränderung 1 % überschritten. Die Größenordnung der Abweichungen der ersten Eigenfrequenz ist vergleichbar zwischen dem Experiment und den Simulationsergebnissen. Dies spricht für die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf reale Strukturen.

Bei realen Offshore Windenergieanlagen schwanken die Eigenfrequenzen aufgrund der variierenden Betriebs- und Umgebungsbedingungen im „unbeschädigten“ Zustand bis ca. 1-1,5 %. Die Versuchs- bzw. Simulationsergebnisse zeigen, dass die Erkennung von relevanten Groutschäden mittels der Überwachung der Eigenfrequenz möglich ist, unter der Voraussetzung, dass die Effekte der Betriebs- und Umgebungsbedingungen auf die Eigenfrequenzen kompensiert werden.

1.3.3 Konzept zur Lastrekonstruktion

Oftmals erfolgt die Bestimmung des Lebensdauerverbrauchs mittels der Theorie der linearen Schadensakkumulation gemäß der Palmgren-Miner-Regel. Hierzu werden in der Regel die Lastkollektive mittels Rainflow-Klassifikation aus den gemessenen Beanspruchungs-Zeitverläufen bestimmt. Eine direkte messtechnische Ermittlung der Turm- bzw. Transition Piece-Biegemomentenbeanspruchungen wird in der Regel mittels der Anordnung von mehreren, über den Kreisumfang des Querschnitts verteilten Dehnungsmessstreifen (oder anderen Dehnungssensoren) realisiert. Dieses direkte Messverfahren erfordert vergleichsweise hohe Installations- bzw. Wartungskosten und zusätzlich die – nicht immer gegebene – Zugänglichkeit zu einem möglichst ungestörten (frei von Anbau- und Einbauteilen) Kreis-Querschnitt.

Als Alternative zur direkten Dehnungsmessung haben sich Methoden zur Lastrekonstruktion, d.h. zur indirekten Bestimmung von Lasten und Lastkollektiven, für die Strukturüberwachung von WEA als kostengünstige Lösung etabliert.

In zahlreichen Offshore Windparks sind ca. 10 % der WEA mit einem SHM-System ausgerüstet, das die direkte Dehnungsmessung DMS an repräsentativen Ebenen der Struktur (i.d.R. dem Turm-Fundament-Übergang) umfasst. Die verbleibenden ca. 90 % der WEA des Windparks werden immer häufiger mit einem in der Sensoranzahl reduzierten SHM-System ausgerüstet.

In diesem Kapitel wird ein praxistauglicher Ansatz zur windparkübergreifenden Ermittlung der Lastkollektive bzw. der Ermüdungsbeanspruchungen und des daraus abgeleiteten Lebensdauerverbrauchs dargestellt. Der dargestellte Ansatz verwendet die im Turmbereich erfassten Bewegungsantworten sowie ein FE-Modell, um interne Kräfte bzw. Momente in der Struktur zu bestimmen. Diverse Prognosemodelle werden durch die Kombination von verschiedenen Aspekten, wie verfügbare Messpositionen oder Annahmen hinsichtlich des Lastmodells und FE-Modells gebildet und bezüglich ihrer Genauigkeit evaluiert. Des Weiteren werden die Unsicherheiten, welche sich aus der Mess- und Modellgenauigkeit bei der Lastrekonstruktion ergeben, aufgezeigt.

Der präsentierte Ansatz wird anhand von realen Messdaten eines Offshore-Windparks validiert. Die Beanspruchungen an der Turm-Transition Piece-Verbindung werden basierend auf den dynamischen Beschleunigungsantworten vom Turmkopf bzw. vom Maschinenhaus in Verbindung mit einem FE-Modell rekonstruiert und mit den entsprechenden Referenzwerten aus direkt gemessenen Dehnungsdaten validiert (möglich bei ca. 10 % der WEA). Nach der Validierung wird die Lastrekonstruktion auf die übrigen (ca. 90 %) Anlagen des Windparks, bei denen ausschließlich Beschleunigungsdaten aufgezeichnet werden, angewendet. Diese ganzheitliche Ermüdungsbewertung bieten einen Einblick in den Lebensdauerverbrauch des gesamten Windparks und ermöglicht darüber hinaus die Ermittlung von Korrelationen zu bestimmten Ereignissen oder Umwelt- und Betriebsbedingungen.

Die präsentierten Ergebnisse beziehen sich auf die Schnittstelle zwischen Turm und Transition-Piece, sind allerdings für jegliche andere Schnittstelle, wie z. B. die Groutverbindung, anwendbar.

1.3.3.1 Ermittlung von einwirkenden Ermüdungslasten

Je nach vorhandener Instrumentierung bestehen zwei Möglichkeiten für die Lastrekonstruktion in einem Windpark:

1. Einige wenige Anlagen im Park sind mit Dehnungssensoren instrumentiert und dienen zur Validierung der Lastrekonstruktion im Windpark. In diesem Fall profitieren die verbleibenden Anlagen (ohne Instrumentierung mit vergleichsweise teuren Dehnungssensoren) von der Validierung an den Referenzobjekten. Die Gesamtunsicherheit der Beanspruchungsermittlung und Lebensdauerschätzung kann auf diese Weise verringert werden. Dieser Fall gilt für die meisten Offshore-Windparks.
2. Alle Anlagen im Windpark sind ausschließlich mit Beschleunigungs- bzw. Neigungssensoren und ohne direkt messende Dehnungssensorik ausgestattet. In diesem Fall erfolgt die Schätzung der Ermüdungsbeanspruchungen ausschließlich mit indirekten Lastrekonstruktionsmethoden (Kombination von Sensordaten und FE-Modell). Eine Validierung im Windpark ist dann nicht möglich.

Im folgenden Abschnitt wird der angewendete Ansatz zur Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchungen, basierend auf der Kombination von dynamischen Strukturantworten und einem FE-Modell, beschrieben. Anschließend werden die Unsicherheiten aufgelistet, welche in der Lastbestimmung aus Dehnungsdaten sowie der Lastrekonstruktion vorhanden sind.

1.3.3.2 Ansatz zur Lastrekonstruktion

Der Lastrekonstruktionsansatz besteht aus einem Lastmodell, einem FE-Modell und den gemessenen Strukturantworten (siehe Abbildung 11).

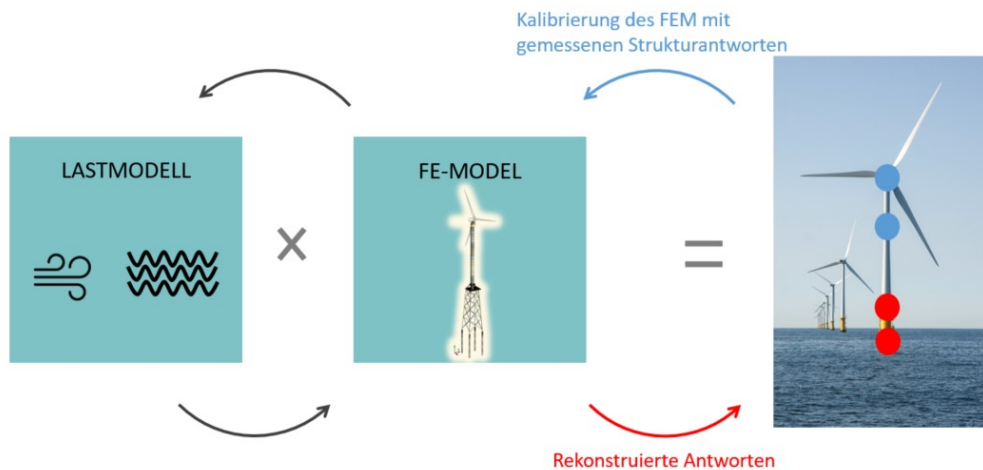


Abbildung 11: Interaktion zwischen den Bestandteilen des in der Lastrekonstruktion angewendeten Vorhersagenmodells.

Das Lastmodell umfasst die Modellierung der auf die Gründungsstruktur einwirkenden Wind- und Wellenlasten. Der Detaillierungsgrad dieser Simulation ist von den getroffenen Annahmen abhängig, welche in der Praxis oft durch die vorhandenen Ressourcen und Design-Informationen definiert werden. Abbildung 12 zeigt vier mögliche Lastmodelle, bei denen eine unterschiedliche Anzahl an Schnittgrößen (Querkraft und Momente), die sich aus den einwirkenden Wind- und Wellenlasten ergeben, enthalten sind. Im Modell 1 wird lediglich der einwirkende Windschub durch eine in Höhe der Rotorwelle wirkende Querkraft berücksichtigt. Modell 2 erhöht die Genauigkeit durch die zusätzliche Abbildung des infolge des Windes wirkenden Momentes. Modell 3 berücksichtigt sowohl Wind- als auch Wellenlasten durch konzentrierte Querkraften und Biegemomente. Der höchste Detaillierungs- und Genauigkeitsgrad wird vom Lastmodell 4 gewährt, welches die Wind- und Welleneinwirkung als Streckenlast berücksichtigt.

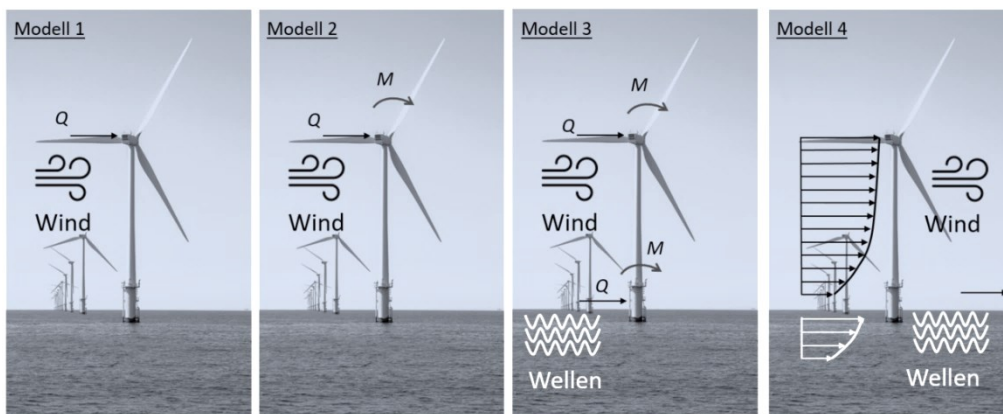


Abbildung 12: Lastmodelle mit verschiedenen Annahmen bezüglich der Wind- und Welleneinwirkung.

Des Weiteren wird ein FE-Modell der Gesamtstruktur benötigt. Im Falle einer Monopfahltragstruktur wird diese inklusive des Transition-Pieces und des Turmes vereinfacht durch Balken-Elemente mit kreisförmigem Querschnitt modelliert. Die Rotormasse, die Masse des Maschinenhauses, die mitschwingende Wassermasse und andere anlagenspezifischen Zusatzmassen werden als Einzel- oder verteilte Massen in das Modell integriert. Die Einbindung des Monopfahls in den Boden wird

vereinfacht durch linear-elastische Einzelfedern modelliert. Die laterale Federsteifigkeit, die Schaftsteifigkeit und die vertikale Steifigkeit an der Pfahlspitze können aus den nichtlinearen p-y, t-z und Q-z Kurven der verschiedenen Bodenschichten gemäß API RP 2GEO [4] durch eine iterative Berechnung ermittelt werden (siehe Abbildung 13). Nach der Modellerstellung erfolgt mit den messtechnisch erfassten dynamischen Antworten eine Modellvalidierung und Anpassung, sodass die zwei ersten Eigenfrequenzen in den zwei Hauptrichtungen mit den gemessenen Eigenfrequenzen übereinstimmen.

Die Anzahl der vorhandenen Messpositionen hat Einfluss auf die Genauigkeit des Vorhersagemodells, da jeder Messpunkt ein Freiheitsgrad darstellt und damit zusätzliche Information zur tatsächlichen Strukturantwort liefert. Eine Validierung und Kalibrierung des gesamten Vorhersagemodells erfolgt durch den Vergleich der rekonstruierten mit den direkt durch Dehnungssensoren erfassten Lasten und wird im Abschnitt 1.3.3.4 exemplarisch dargestellt.

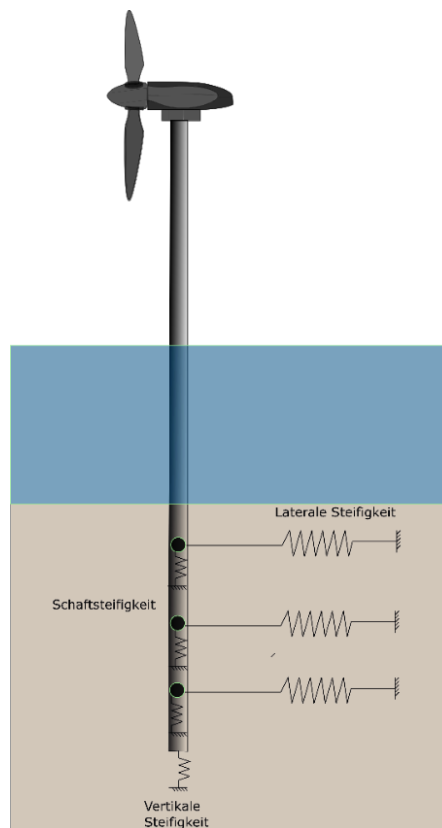


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Boden-Struktur-Modells einer Offshore WEA mit Monopfahl-Gründungsstruktur.

1.3.3.3 Unsicherheiten in der Ermittlung von Ermüdungslasten

Der Prozess der Lastbestimmung, sowohl durch direkte Dehnungsmessung als auch durch Lastrekonstruktion, beinhaltet einige Unsicherheiten, welche durch verschiedene Faktoren, wie z. B. Messfehler, Kalibrierungsfehler und die Methodik der Lastrekonstruktion selbst, verursacht werden. Im Folgenden werden einige Quellen der Unsicherheiten, die in der Bewertung von Last(kollektiv)en vorhanden sind, aufgeführt:

- Messunsicherheiten:
 - Messunsicherheiten und Fehler aus den Sensoren (z. B. Amplituden- und Phasenfehler sowie Offsetdrifts durch Temperatur und Alterung von Beschleunigungs-, Neigungs- und Dehnungssensoren)
 - Messunsicherheiten und Fehler aus der Datenerfassung (z. B. Digitalisierungsfehler, Fehler durch Signalfilter, etc.)
 - Unsicherheiten / Fehler aus der Kalibrierung der Sensoren
- Modellunsicherheiten:
 - Fehler aus der Abweichung zwischen den Eigenschaften der real errichteten Strukturen (As-Built) und den zugehörigen Design-Annahmen (z. B. Exzentrizität der Rotor-Gondel-Baugruppe).
 - Vereinfachte / fehlerhafte Modellannahmen, z. B. Abweichungen zur realen Struktur, die auf Nichtlinearitäten und Ungenauigkeiten bei den Baugrundsteifigkeiten zurückzuführen sind.
- Unsicherheiten des Lastrekonstruktionsansatzes:
 - Da die Lastrekonstruktion auf dem FE-Strukturmodell beruht ergeben sich neben den vorgenannten Modellunsicherheiten auch Fehler aus den zugrundeliegenden Lastannahmen (siehe Abbildung 12).

1.3.3.4 Validierung des Lastrekonstruktionsansatzes in einem Offshore Windpark

Die Validierung des Lastrekonstruktionsansatzes erfolgte basierend auf Daten eines Offshore Windparks, welcher von Wölfel überwacht wird, und nicht basierend auf Daten des Windparks Meerwind Süd | Ost. Der Grund dafür ist, dass die Datenanbindung zum Windpark zum Zeitpunkt der Validierung nicht vorhanden war. In diesem Abschnitt werden exemplarisch die Ergebnisse aus diesem OWP dargestellt. Die Strukturen verfügen über eine Monopfahlgründungsstruktur, die über eine Flanschverbindung mit dem Turm verbunden ist. Die Sensorkonfiguration bei 10 % der Anlagen im Windpark umfasst Dehnungsmessstreifen und Neigungssensoren an der Turm-Transition Piece-Verbindung sowie Beschleunigungssensoren am Turmkopf. Die verbleibenden Anlagen im Windpark haben ebenfalls jeweils einen Neigungs- und Beschleunigungssensor, jedoch keine Dehnungssensoren.

Zuerst erfolgte die Validierung des Ansatzes an den Anlagen, bei denen auch die Dehnungen erfasst werden. Die Gesamtstruktur wurde, wie im Abschnitt 2.1 beschrieben, mittels finiten Elementen modelliert. Mehrere Vorhersagemodelle wurden erstellt und für die Rekonstruktion der Beanspruchungen am Turmfuß-Transition Piece-Übergang angewendet. Die aus Beschleunigungs- und Neigungssensoren sowie FE-Modell rekonstruierten Biegebeanspruchungen wurden mit den aus den DMS direkt messtechnisch ermittelten Beanspruchungen verglichen.

Abbildung 14 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und rekonstruierten Biegemomenten um die x- und y- Achsen für zwei Vorhersagemodelle. Das zweite Vorhersagemodell (siehe untere Graphen) weist eine höhere Genauigkeit im Vergleich zum ersten Vorhersagemodell auf (siehe obere Graphen). Dies äußert sich einerseits durch eine verbesserte Rekonstruktion der niederfrequenten Komponenten des Signals, wie bei den Biegemomenten um die y-Achse (M_y) zu beobachten ist, und andererseits durch eine verbesserte Rekonstruktion der Beanspruchungsamplituden. Basierend auf den

Validierungsergebnissen wurde das Lastrekonstruktionsmodell bezüglich Genauigkeit der Schädigungsbewertung optimiert. Anschließend wurde dieses Modell auf alle Anlagen des Windparks übertragen, um eine kontinuierliche Bewertung der Beanspruchungskollektive und den daraus abgeleiteten schadensäquivalenten Lasten (Damage Equivalent Loads – DEL) bzw. den Ermüdungsschädigungen windparkübergreifend zu erhalten.

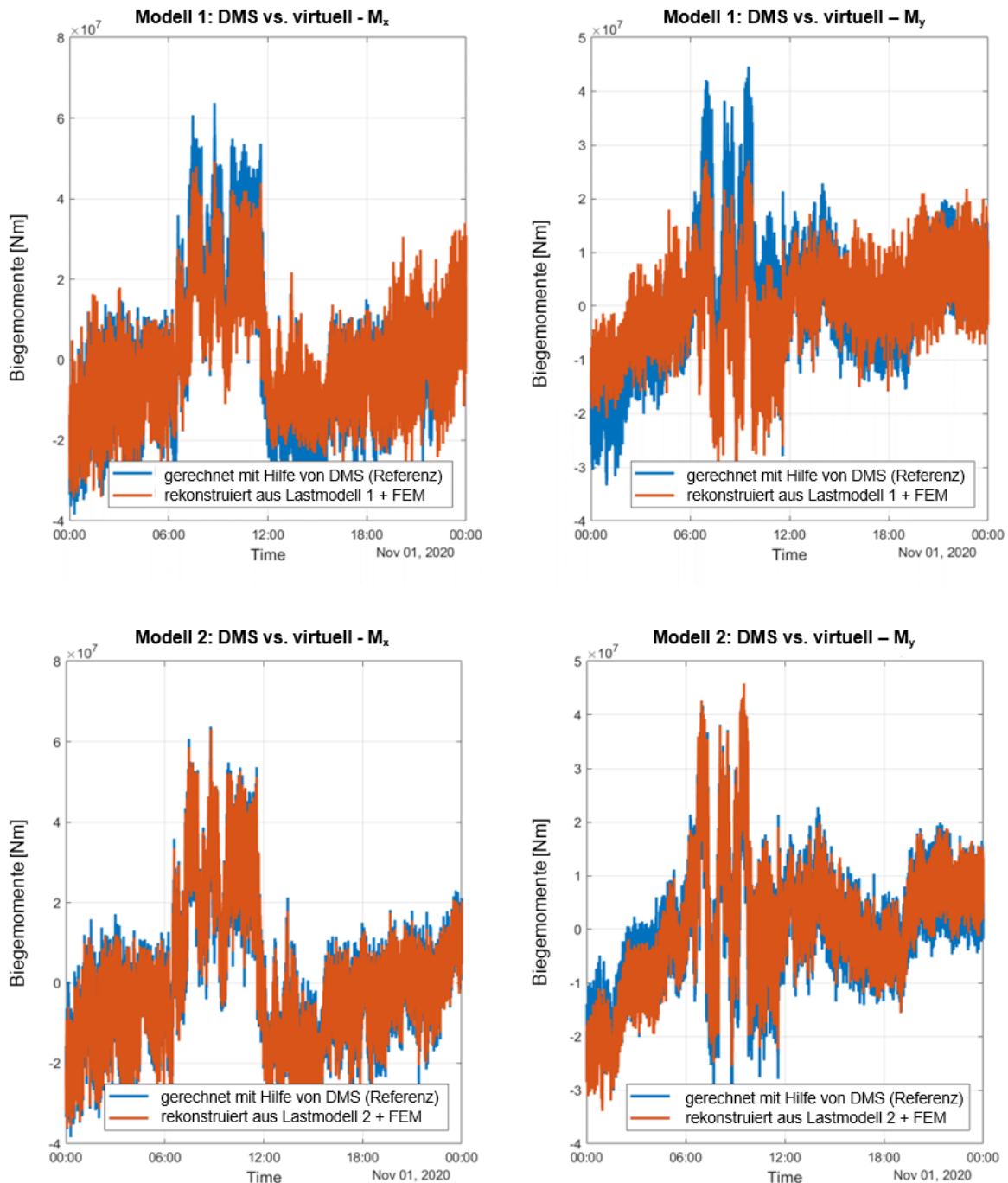


Abbildung 14: Gegenüberstellung von gemessenen Biegemomenten aus Dehnungssignalen und rekonstruierten Biegemomenten aus dynamischen Sensordaten Vorhersagemodell 1 (zwei oberen Graphen) und Vorhersagemodell 2 (zwei unteren Graphen).

Die Entwicklung des Lebensdauerverbrauchs gegenüber den Designannahmen lässt sich anhand des Vergleichs von DEL an der Turm-Transition Piece-Verbindung realisieren. Hierzu werden Ergebnisse beispielhaft für drei Anlagen in Abbildung 15 dargestellt. Die Ergebnisse werden über ein Jahr für die Biegemomente um die x- und y-Achse jeweils im linken und rechten Graph gezeigt. Der Lebensdauerverbrauch wurde an 12 Punkten, gleichmäßig um den Kreisumfang des Turmquerschnittes verteilt, ermittelt. Die jeweils farblich markierten Flächen zeigen die Varianz des ermittelten Lebensdauerverbrauchs umhüllend für alle Punkte um den Kreisumfang und unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Beanspruchungsmessung bzw. -rekonstruktion. Der aus dem Design erwartete Lebensdauerverbrauch unter der Annahme eines linearen Schädigungsverlaufs wird durch die schwarze Linie gekennzeichnet.

In dieser Darstellung sind besonders schädigungsrelevante Ereignisse deutlich als vertikale Stufen zu erkennen. Erwartungsgemäß zeigen alle Anlagen ähnliche Verläufe, da diese an eng benachbarten Standorten ähnlichen Wind- und Wellenereignissen ausgesetzt sind.

Die Windenergieanlage 01 zeigt – in diesem Beitrag beispielhaft – einen höheren Lebensdauerverbrauch als im Design für den gleichen Zeitraum angenommen wurde. Mögliche Gründe hierfür können projektspezifisch in weitergehenden gezielten Untersuchungen ausgearbeitet werden. Es ist zu erkennen, dass derartige Darstellungen des Lebensdauerverbrauchs eine einfache Identifikation von Assets erlauben, bei denen weitergehende Untersuchungen und Betriebsoptimierungen zu empfehlen sind.

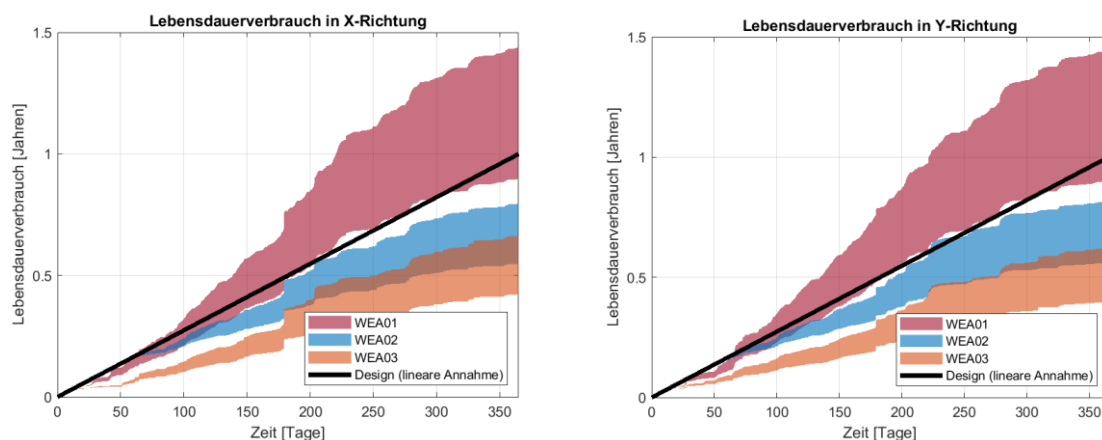


Abbildung 15: Entwicklung des Lebensdauerverbrauchs in Jahren für drei Windenergieanlagen auf Basis von rekonstruierten Lasten. Der im Design angenommene lineare Lebensverbrauch wird durch die schwarze Linie gezeichnet.

Darüber hinaus ist es möglich, Ereignisse mit einem höheren Schädigungsbeitrag und die entsprechenden Betriebszustände zu identifizieren, sodass mögliche Ursachen zeitlich eingegrenzt werden können. Die Untersuchung der Korrelation zwischen Schädigungsbeitrag und Betriebs- und Umgebungsbedingungen (Engl: Environmental and Operational Conditions bzw. EOC) liefert einen erheblichen Beitrag für die Identifikation von Betriebszuständen, die ermüdungs-intensiv sind und bei häufigem Auftreten die strukturelle Integrität gefährden.

Im linken oberen Graph von Abbildung 16 wird die absolute Schädigungsbeitragsdichte als Farbe in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und Generator Drehzahl dargestellt (Skalierung aus Vertraulichkeitsgründen ausgeblendet). Diese Darstellung entspricht dem Beitrag zur Gesamt-

schädigung über die Zeit entsprechend Abbildung 15. Eine Normierung über die Auftretenshäufigkeit, wie im rechten oberen Bild dargestellt, gibt eine klare Auskunft darüber, welche Betriebszustände besonders ermüdungsrelevant für die Struktur waren. Vergleichbar kann eine Normierung über die Ertragsdichte vorgenommen werden, wie im unteren Bild dargestellt. Hierbei können Betriebszustände erkannt werden, die ein besonders ungünstiges Verhältnis zwischen Strukturschädigung und wirtschaftlichem Ertrag aufweisen.

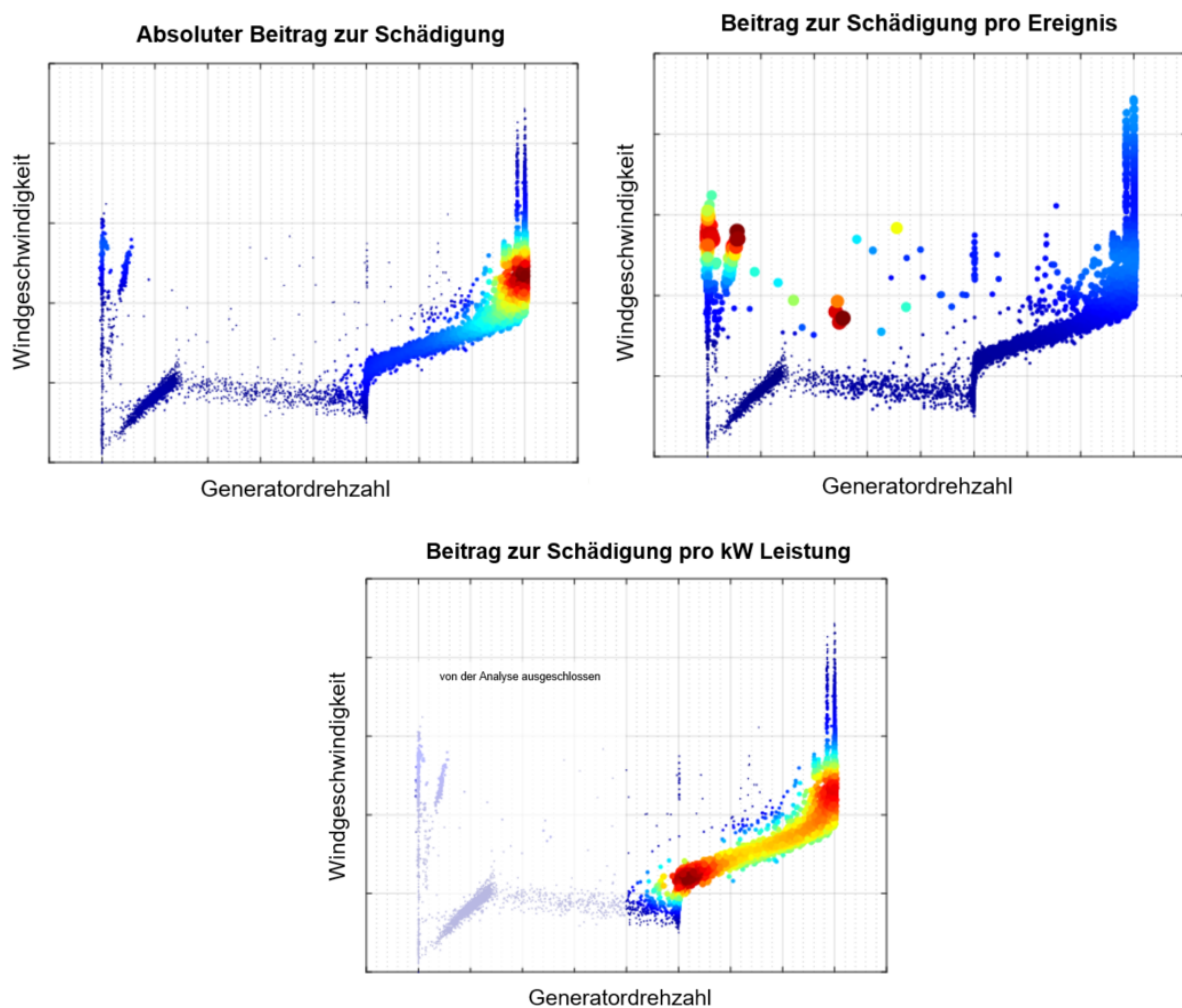


Abbildung 16: Absolute und relative Schädigungsbeiträge in Abhängigkeit von Betriebs- und Umgebungsbedingungen

1.3.3.5 Zusammenfassung

Die zuverlässige Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchungen und deren Beurteilung auf Windparkebene ist essenziell für die datengesteuerte Optimierung des Anlagenbetriebs und für eine Bewertung des Potentials zur Lebensdauererlängerung der Gründungsstrukturen. Einwirkende Beanspruchungskollektive können direkt durch Dehnungsmessungen erfasst werden. Allerdings sind Dehnungssensoren aus technischen und finanziellen Gründen nicht an mehreren Querschnittsebenen einer Struktur und nicht an allen WEA eines Windparks installierbar. Alternativ können die Beanspruchungskollektive durch eine Kombination von messtechnisch erfassten Strukturantworten des Turmes (Beschleunigungen, Neigungen) in Verbindung mit einem FE-Modell rekonstruiert werden.

Dieser Prozess wird häufig als Lastrekonstruktion mittels virtueller Sensoren bzw. digitalem Zwilling (im Englischen Digital Twin) bezeichnet.

Auf Basis von messtechnisch ermittelten bzw. rekonstruierten Beanspruchungskollektiven kann die tatsächlich aufgetretene Schädigung aus Einstufenkollektiven bzw. DEL bestimmt werden, welche direkt mit den Annahmen bzw. Berechnungen aus dem Strukturdesign vergleichbar sind. Der vorgestellte Ansatz zur Lastrekonstruktion mittels Digital Twin benötigt keine direkten Dehnungsmessungen. Bei größeren Windparks, z. B. Offshore, wird jedoch ergänzend empfohlen, einzelne WEA mit Dehnungssensoren auszurüsten, um eine windparkindividuelle Validierung zu ermöglichen. Da die zur Lastrekonstruktion benötigte Neigungs- bzw. Beschleunigungssensorik relativ einfach im Turmbereich installiert werden kann und vergleichsweise teure Dehnungssensoren nicht benötigt werden, ist ein vollständiges Populationsmonitoring – gemeint ist die Ausrüstung aller WEA im Windpark mit einem Strukturmonitoringsystem – wirtschaftlich tragfähig.

Der in diesem Kapitel präsentierte Ansatz zur Lastrekonstruktion zeigt, dass eine sehr gute Übereinstimmung zwischen direkt mittels Dehnungssensoren gemessene und mittels Lastrekonstruktion erfasste Beanspruchungen auch mit einfachen Lastmodellen erreicht werden kann. Die damit verbundenen Ungenauigkeiten in der Beanspruchungsermittlung sind quantifizierbar. Bei Windparks, die vollständig mit Strukturüberwachungssystemen ausgerüstet sind zeigt sich regelmäßig, dass sich der Lebensdauerverbrauch innerhalb des Windparks nicht gleichmäßig verteilt und daher jede Anlage individuell betrachtet werden sollte. Die Analyse der Schädigungsentwicklung und der Vergleich zwischen den Anlagen liefern wichtige Informationen über Standorte mit überdurchschnittlichem Lebensdauerverbrauch sowie über Ereignisse mit einem hohen Schädigungsbeitrag. Schließlich können suboptimale Betriebszustände durch Korrelationsanalyse zwischen Schädigung und Betriebs- und Umgebungsbedingungen identifiziert werden.

Die Ergebnisse dieses Kapitels beziehen sich auf eine OWEA mit Flanschverbindungen zwischen Turm und TP sowie zwischen TP und MP. Allerdings kann der Ansatz auf Anlagen mit einer Groutverbindung übertragen werden. Im nächsten Abschnitt wurden die Daten von Meerwind Süd | Ost in dieser Hinsicht analysiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Ansatz für Groutverbindungen erfolgreich übernommen werden kann (siehe Abschnitt 1.4.3). Dieser Ansatz wurde mittlerweile in mehreren kommerziellen Offshore Projekten zur Einschätzung der Ermüdungslasten bei Anlagen ohne DMS umgesetzt und validiert.

1.4 Windparkorientiertes Groutmonitoring in Meerwind Süd | Ost

1.4.1 Zielsetzung

Die entwickelten SHM-Methoden wurden auf Anlagen des Windparks Meerwind Süd | Ost, angewendet und validiert. Ziel war es zu untersuchen, ob die Lasten an der Groutfuge der Anlagen anhand von Beschleunigungs- bzw. Neigungsantworten und eines Modells erfolgreich rekonstruiert werden können.

1.4.2 Austausch mit WindMW und Vorbereitung

Design- und Geometriedaten der Meerwind Süd | Ost Anlagen waren erforderlich, um die SHM-Algorithmen zu implementieren und das im Abschnitt 1.3.2 beschriebene vereinfachte FE-Modell zu erstellen. Diese wurden vom Windparkbetreiber WindMW zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus hat der Windparkbetreiber bei den acht Anlagen mit einem detaillierten SHM-System Gondelumdrehungen in sogenannten Zero-Load Bedingungen durchgeführt. Zero-Load Bedingungen entsprechen geringen Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen. Diese Daten dienen zur Kalibrierung der Sensoren – vor

allen der Dehnungsmessstreifen. Abbildung 17 zeigt exemplarisch das tiefpassgefilterte Dehnungssignal von Anlage M16 während der Gondelumdrehung. Das Signal im rot markierten Bereich wurde zur Sensorkalibrierung verwendet. In Abbildung 18 wird der Vergleich zwischen analytischen (d.h. erwarteten) und gemessenen Lasten sowie die Validierung der Sensororientierung für einen Beschleunigungsaufnehmer dargestellt.

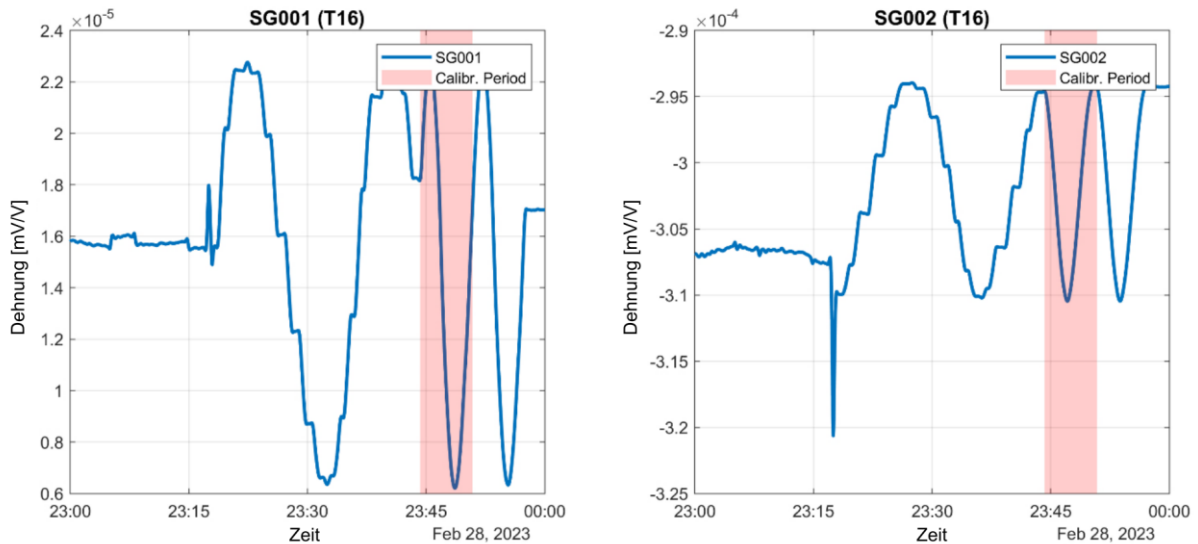


Abbildung 17: Tiefpassgefilterte Daten der Dehnungsmessstreifen von Anlage M16. Das Signal im rot markierten Bereich wurde für die Sensorkalibrierung verwendet.

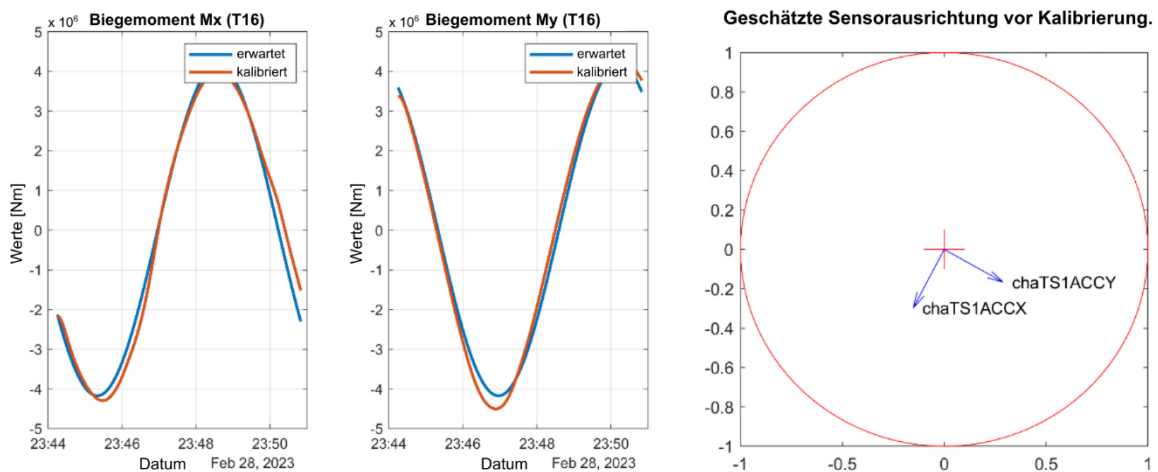


Abbildung 18: Validierung der Lasten und Sensororientierung anhand der Gondelumdrehungsdaten für Anlage M16.

Im Abschnitt 1.3.2 wurden zwei FE-Modelle für die Anlage M07 des Windparks Meerwind Süd | Ost vorgestellt. Beim vereinfachten Modell wurde die Groutfuge vereinfacht mittels Balkenelementen, die durch eine Ersatzsteifigkeit charakterisiert wurden, modelliert. Dieses Modell wurde angepasst, sodass die zwei ersten Biegeeigenfrequenzen mit den gemessenen übereinstimmen. Die Steifigkeit der Anlage wurde auf Basis dieses Modells ermittelt und ist in die Lastrekonstruktionsansätze eingeflossen. Die Steifigkeit wurde ebenfalls experimentell aus den Gondelumdrehungsdaten ermittelt.

1.4.3 Validierung der Lastrekonstruktion

Verschiedene Ansätze zur Lastrekonstruktion wurden umgesetzt. Diese unterscheiden sich durch die Anzahl und die Typen der dynamischen Sensoren, welche in Kombination mit der aus dem FE-Modell extrahierten Steifigkeit der Struktur zur Schätzung der Lasten an der Groudfuge verwendet wurden. Z.B. nur Beschleunigung am Turmkopf, oder Beschleunigung am Turmkopf und Neigung am TP usw.

In *Abbildung 19* werden die Zeitreihen der Biegemomente aus drei Lastrekonstruktionsansätzen über einen Tag verglichen. Die dargestellten Ansätze umfassten die aus dem FE-Modell ermittelten Steifigkeit. Die Daten aus an der Groudfuge installierten Dehnungsmesstreifen wurden ebenfalls zur Ermittlung der Biegemomente auf dieser Ebene verwendet. Diese werden in blau dargestellt und dienen als Referenz für die Validierung der anderen Ansätze. An diesem Tag lieferten zwei der drei getesteten Lastrekonstruktionsmodelle eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Biegemomente um die X-Achse (d.h. um die Ost-West-Achse). In Y-Richtung (d.h. um die Nord-Süd-Achse) weisen die rekonstruierten Biegemomente eine zusätzliche quasistatische Komponente im Vergleich zu den DMS-Ergebnissen auf.

In *Abbildung 20* werden die Histogramme der Biegemomente (links) und die basierend auf schadensäquivalenten Lasten ermittelte kumulierte Schädigung für denselben Tag dargestellt. Das Histogramm zeigt, dass die kleinen Amplituden von den Lastrekonstruktionsmodellen unterschätzt werden, aber die restlichen Amplituden relativ gut abgebildet werden können. Der Verlauf der kumulierten Schädigung ist vergleichbar zwischen den DMS und den Lastrekonstruktionsansätzen, wird jedoch runterskaliert bzw. unterschätzt. Diese Abweichung lag eventuell an einer Abweichung der aus dem FE-Modell ermittelten Steifigkeit zu der Steifigkeit der realen Struktur (trotz Modellanpassung).

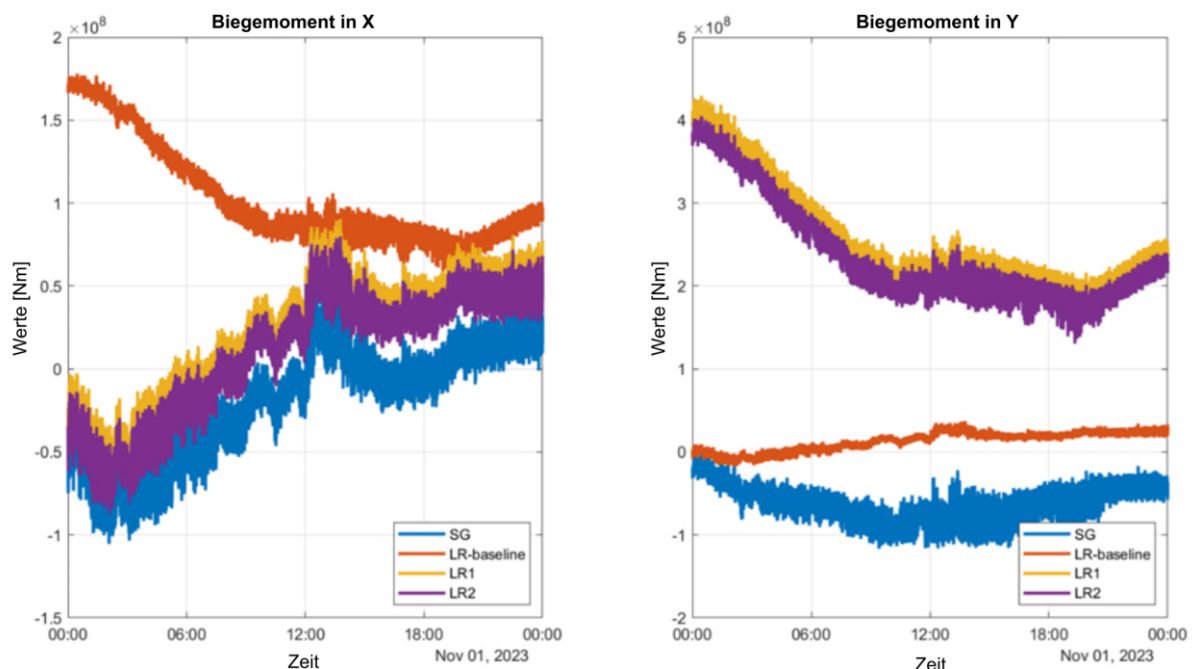


Abbildung 19: Vergleich der Biegemomente aus verschiedenen Lastrekonstruktionsansätzen. Die blaue Kurve entspricht dem aus Dehnungsmessung ermittelten Biegemoment, welcher als Referenz für die Validierung dient.

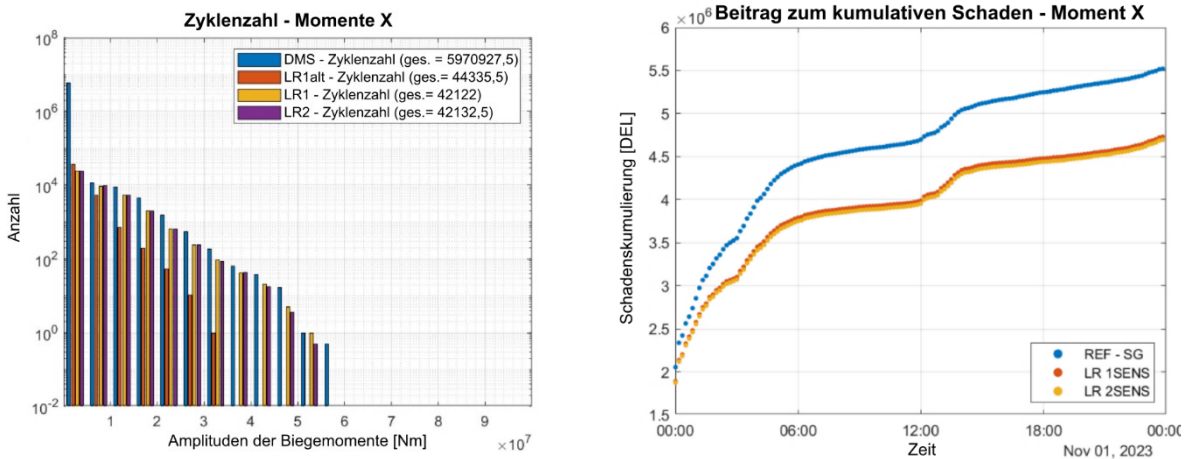


Abbildung 20: Vergleich der Histogramme der Biegemomente und der kumulierten Schädigung aus verschiedenen Lastrekonstruktionsansätzen. Blau entspricht den Ergebnissen aus Dehnungsmessung, welche als Referenz für die Validierung dienen.

Aus diesem Grund wurde die Notwendigkeit erkannt, die Steifigkeit experimentell zu ermitteln. Dieser alternative Ansatz hat den Vorteil, dass es kein FE-Modell voraussetzt. Verschiedene Konfigurationen wurden getestet. Die höchste Genauigkeit konnte für ein Lastrekonstruktionsmodell erreicht werden, welches die experimentell ermittelte Steifigkeit und die Turmkopfbeschleunigung umfassten. Die Ergebnisse dieser Konfiguration für die Anlagen M07 und M31 werden in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abbildung 21 zeigt die 10-minütigen Werte der schadensäquivalenten Lasten für die Anlagen M07 (links) und M13 (rechts). In der Abbildung werden die Ergebnisse auf Basis der DMS mit den geschätzten pro Richtung verglichen. Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein. Die Linearität zwischen der mittels DMS und der geschätzten Ermüdungsschädigung werden in Abbildung 21 gezeigt. Die oberen Graphen zeigen die Linearität für die 10-minütigen Beiträge zur Schädigung, während die untere Reihe die Linearität für die kumulierte Ermüdungsschädigung darstellt. Die Linearität bei Anlage M13 ist für beide Achsen sehr gut und der lineare Faktor liegt sehr nahe eins. Bei Anlage M07 sind die Ergebnisse immer noch linear zueinander, aber mit einem linearen Faktor ungleich eins in der Y-Richtung.

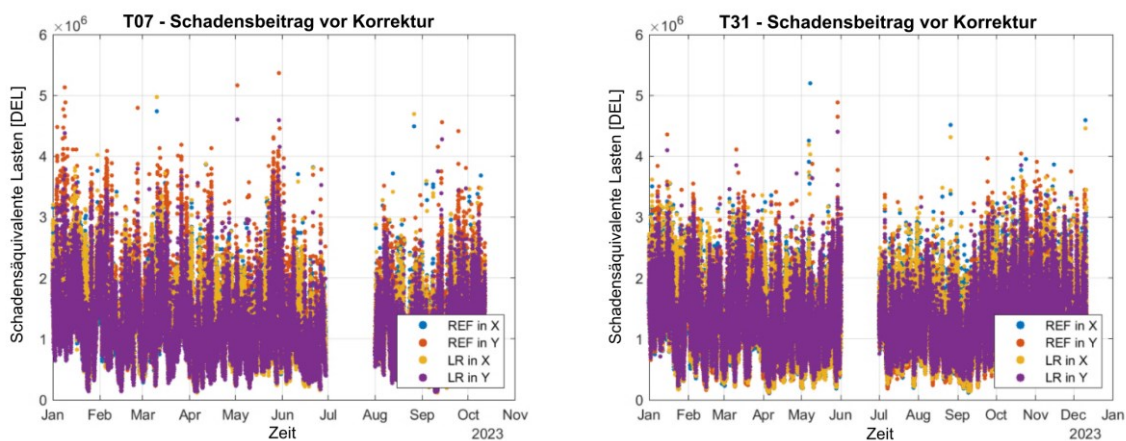


Abbildung 21: 10-minütige schadensäquivalente Lasten für die Anlagen M07 und M31 bei Anwendung des optimalen Lastrekonstruktionsansatzes (experimentelle Steifigkeit & Turmkopfbeschleunigung).

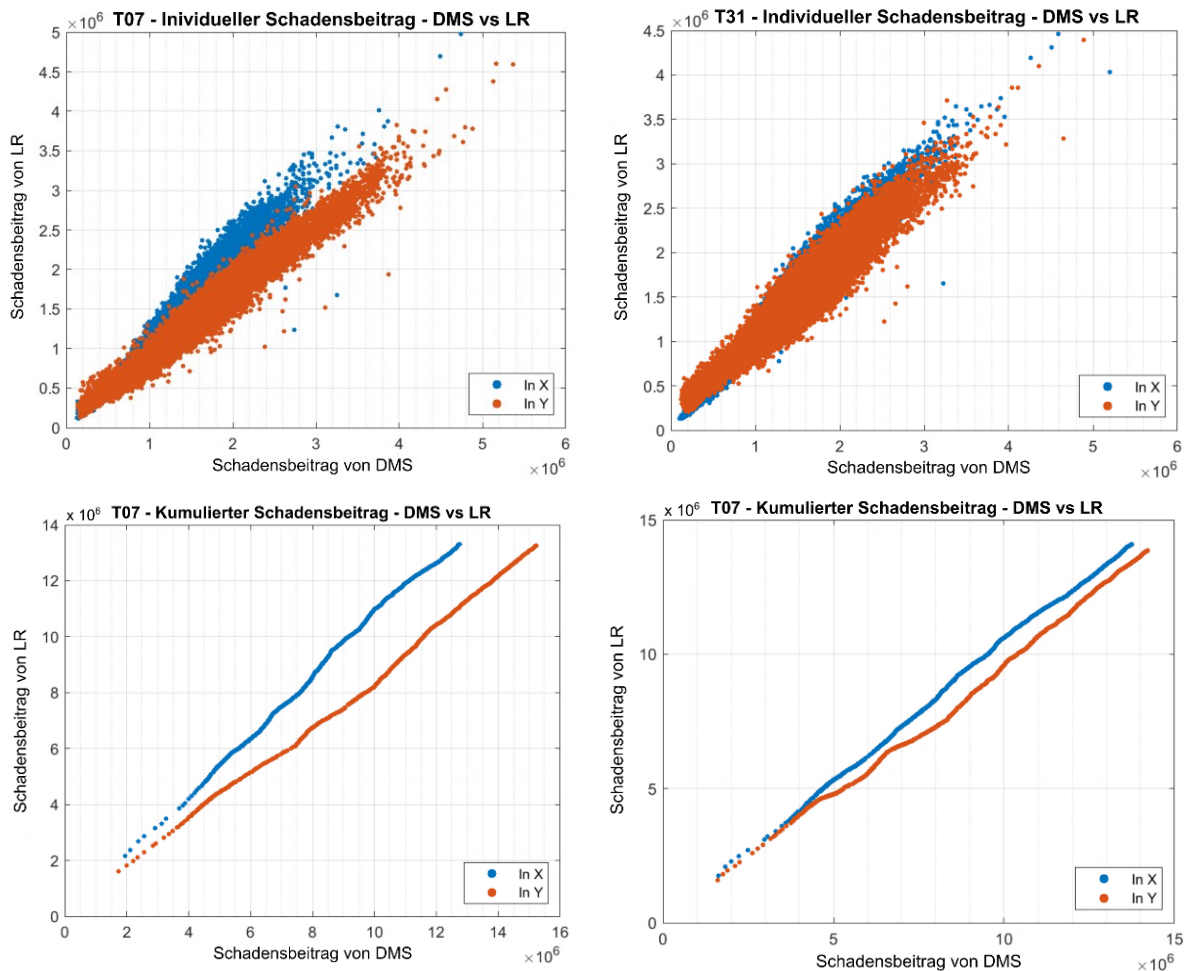


Abbildung 22: Linearität zwischen der mittels DMS gemessenen und geschätzten Ermüdungsschädigung für die Anlagen M07 und M31. 10-minütige Beiträge zu Schädigung (oben), kumulierter Beitrag zu Schädigung (unten).

Diese lineare Abweichung zwischen mittels DMS gemessener und geschätzter Ermüdungsschädigung kann mittels eines Umrechnungsfaktors korrigiert werden. Die Umrechnungsfaktoren für die Anlagen M07 und M13 werden Abbildung 23 dargestellt. Bei Anlage M07 liegen die Umrechnungsfaktoren bei ca. 0.95 in X-Richtung und 1.15 in Y-Richtung. Bei Anlage M13 liegen die Umrechnungsfaktoren bei 0.975 in X-Richtung und 1.025 in Y-Richtung.

Der Verlauf den Schadensakkumulation für den optimalen Lastrekonstruktionsansatz (vor der Anwendung der Umrechnungsfaktoren) und den Ergebnissen aus den DMS-Daten werden für beide Anlagen (M07 und M13) in Abbildung 24 dargestellt. Die Kurven zeigen, dass sowohl der allgemeine Verlauf der Schadensakkumulation als auch besondere Ereignisse, wie der Sprung Ende Mai 2023, sehr gut rekonstruiert werden können. Es konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Lastrekonstruktionsansatz eine sehr hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit aufweist.

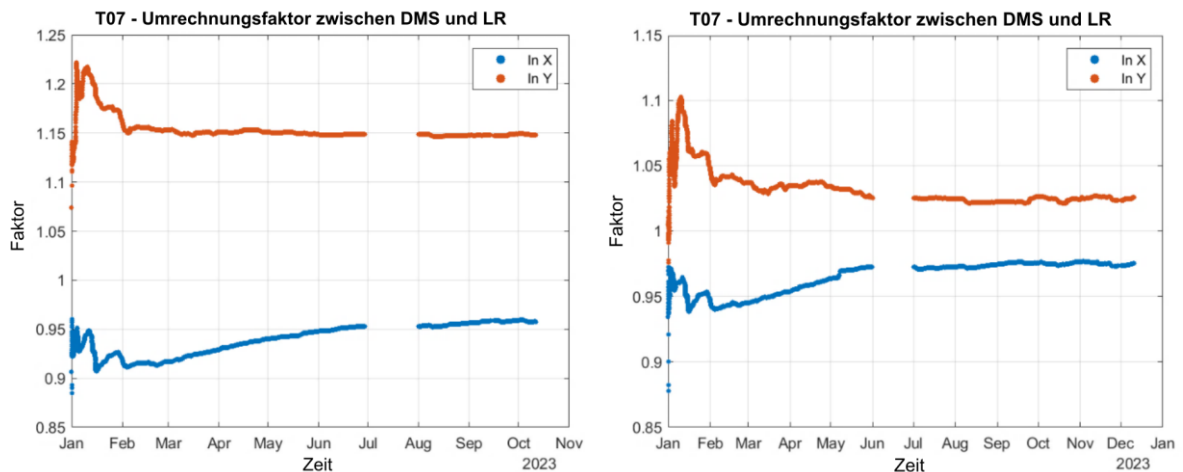


Abbildung 23: Umrechnungsfaktor zwischen mittels DMS gemessener und geschätzter Ermüdungsschädigung für die Anlagen M07 und M31.

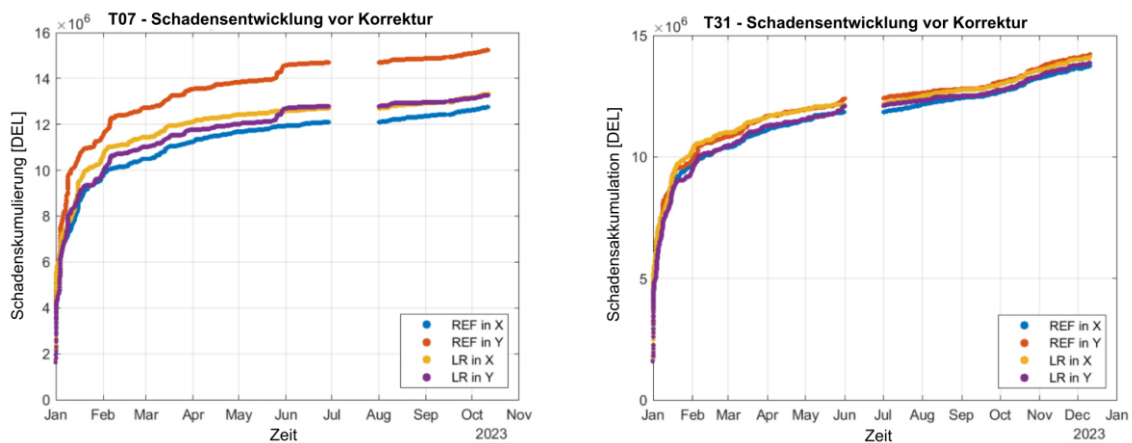


Abbildung 24: Entwicklung der Schadensakkumulation der Anlagen M07 (links) und M13 (rechts). Vergleich zwischen aus DMS ermittelten und rekonstruierten Ergebnissen. Die eingeschätzten Ergebnisse umfassen keinen Umrechnungsfaktor.

1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse im Konsortium

1.5.1 IWES

Das vom Fraunhofer IWES bearbeitete Teilvorhaben „Großmaßstäbliche Modellversuche an Monopile-Tragstrukturen und numerische Analysen zur Bewertung der messtechnischen Überwachung des Tragverhaltens von Grout-Verbindungen“ befasste sich mit der Prüfung der Anwendbarkeit und Validierung von faseroptischen Sensoren in hochfestem Vergussmörtel und dem Monitoring von Schäden in großmaßstäblichen physikalischen Modellen von Grout-Verbindungen für Offshore-Windenergieanlagen. Das primäre Ziel im Verbund war die Entwicklung und das prototypische Anwenden der Faser-Bragg-Sensoren zur Erfassung des Degradationsvorgangs im hochfesten Vergussmörtel und die Verbesserung der für ein Degradationsmodell notwendigen Datengrundlagen. Die Analyse der möglichen Übertragbarkeit und der Anwendung von Erkenntnissen im Windpark insbesondere im Hinblick auf die Bewertung der Lebensdauer von Grout-Verbindungen vervollständigte die Ergebnisse des Verbundvorhabens.

Das Fraunhofer IWES hat dazu ein physikalisches Modell einer Monopile-Tragstruktur mit biegebeanspruchter Grout-Verbindung ausgelegt sowie die Versuchsdurchführung geplant und geleitet. Der Modellmaßstab lag unter Berücksichtigung heutiger Anlagengrößen bei etwa 1:20. Zur Schädigungsanalyse wurde ein Messkonzept ausgelegt und mit allen Verbundpartnern abgestimmt. Der Versuch wurde schließlich in enger Kooperation mit dem Testzentrum Tragstrukturen Hannover der Leibniz Universität Hannover realisiert.

Im Zuge des physikalischen Versuchs konnte der Schädigungsprozess in der Grout-Verbindung unter Wechsellasten mit stufenweise gesteigerten Lastniveaus nachgebildet und mit Hilfe der faseroptischen Sensoren im Grout erfolgreich beobachtet werden. Die Reduktion der Steifigkeit der Verbindung konnte mit Ergebnissen eines Structural-Health-Monitoring-Systems korreliert und auch mittels numerischer Simulation nachgebildet werden. Zur numerischen Abbildung des physikalischen Modells wurde ein Finite-Elemente-Modell genutzt. Es wurde mit Hilfe eines parametrisierten Programmsystems erstellt, das dem Anpassungsbedarf im Designverlauf direkt nachkam und schließlich auch die Übertragung des Modellansatzes auf Tragstrukturen im Windpark ermöglichte. Die Nutzung physikalischer Ergebnisse aus Modellversuchen im Rahmen der Bewertung und Optimierung von Structural-Monitoring-Systemen wurde neben der Validierung und Anwendung numerischer Simulationsmethoden und Materialmodelle im physikalischen Modellversuch als auch im Windpark erfolgreich aufgezeigt.

1.5.2 LUH

Die Grout-Verbindung ist eine hybride Verbindung zur Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, bei der zwei Stahlrohre (Pile und Sleeve) mit unterschiedlichen Durchmessern konzentrisch ineinander geführt werden und der Zwischenraum mit hochfestem Mörtel vergossen wird. Im Rahmen experimenteller Untersuchungen war es bisher nur möglich durch ein Auftrennen der äußeren Hülle die Schädigung von Groutverbindungen nach Versuchsende zu erfassen. Wesentliches Forschungsziel des Projektes Grout-WATCH war die Entwicklung einer In-Situ faseroptischen Sensorik zur Instrumentierung innerhalb der Grout-Verbindung. Das prototypische Messsystem zur Schädigungserfassung im Grout wurde in kleinmaßstäblichen Versuchen in Form modifizierter Schubversuche umfassend validiert und somit die Anwendung neuartiger Faser-Bragg-Gitter-Sensoren zur Interpretation des bislang unbekanntes Degradationsprozesses eines Vergussmörtels innerhalb von Groutverbindungen realisiert. Aufbauend auf dem entwickelten Messkonzept konnte der detaillierte Degradationsvorgang auf Grundlage eines umfangreichen Versuchsprogramms an mittelskaligen Probekörpern beschrieben und ein datenbasiertes Prognosemodell für die Schadensakkumulation aufgebaut werden. Die Entstehung von Rissen und deren Entwicklung konnte mit globalen Phasenwechseln der Verbindungslebensdauer korreliert werden. Zusätzlich wurde eine realistische S-N Kurve für axial pulsierend belastete Grout-Verbindungen unter Wasser abgeleitet. In Großversuchen mit biegebeanspruchten Groutverbindungen wurde das Ermüdungsversagen des Grout-Materials mit einem Hydraulikzylinder in verschiedenen Laststufen induziert, sodass lokale und globale Monitoringmethoden verglichen werden konnten. Bei der Erarbeitung automatisierter Methoden des Maschinellen Lernens hat sich die Vernetzung von Beschleunigungszeitreihen mit einem Vorhersagemodell der künstlichen Intelligenz (KI) als vorteilhaft herausgestellt. Der In-Situ-Einsatz der faseroptischen Sensorik zur Dehnungserfassung konnte sowohl in den mittelskaligen als auch in den großmaßstäblichen Versuchen verifiziert werden, sodass die Grundlage für eine mögliche Applikation bei realen Offshore-Strukturen erarbeitet wurde. Der Einsatz von KI-gestützten Monitoringmethoden erlaubt eine Anwendung auch bei bestehenden realen Anlagen.



1.5.3 MIOPAS

Im Rahmen des Teilprojektes „Faseroptische Sensorik zur Erfassung von Schädigungen im Grout“ wurde von der MIOPAS ein neuartiger miniaturisierter faseroptischer Dehnungssensor entwickelt. Dieser ermöglicht die lokale Erfassung von Dehnungen im Grout, um damit das Versagen der Groutverbindung zu monitoren und örtliche Veränderungen nachweisen zu können. Auf Basis der faseroptischen Faser Bragg Gitter Technologie (FBG) wurde dazu ein Sensor entwickelt, der im sehr kleinen Groutspalt im Labor und auf den Prüfständen zum Einsatz kommt. Als Herausforderung in diesem Projekt ist der miniaturisierte mechanischer Aufbau des Sensors zu sehen, der für eine Einsatz im Groutspalt eine ausreichende Robustheit Stabilität für Querkräfte aufweisen und einen Einsatz im hochalkalischen Beton ermöglichen soll. Die dazu entwickelte Sensorplattform, ermöglicht die Herstellung von unterschiedlichen Messlängen und ermöglicht einen vielseitigen Einsatz in den unterschiedlichen Anwendungsszenarien bei den Partnern. Die gängigsten Sensorlängen in diesem Projekt sind 50, 300 und 400 mm. Insgesamt wurden jedoch 5 unterschiedliche Längen aufgebaut. Für die optischen Sensoren wurde ein Befestigungssystem im Groutspalt entwickelt, das beim VergROUTEN für eine sichere Positionierung sorgt. Für die Versuche bei den Partnern wurden Auswerteeinheiten zur Verfügung gestellt und der Aufbau der Messtechnik zusammen mit den Partnern umgesetzt. Insgesamt wurden mehr als 220 Sensoren für die notwendigen Versuche im Labor und an den Versuchseinrichtungen der einzelnen Institute der Leibniz Universität Hannover und des Fraunhofer IWES entwickelt und die Sensoren zusammen für den Grouteinsatz installiert.

1.5.4 Wölfel

Wölfels Schwerpunkt in Grout-WATCH war die Signalanalyse eines zukünftigen Monitoringsystems für Grout-Verbindungen an OWEA. Dieses System stützt sich auf zwei Komponenten:

- a) Methoden zum Populationsmonitoring für Altanlagen unter Nutzung vorhandener Sensorik, und deren Validierung im Windpark Meerwind Süd | Ost.
- b) SHM-System für zukünftige Groutverbindungen, in denen die im Projekt entwickelte Sensorkonfiguration eingesetzt werden kann.

Für beide Komponenten entwickelte Wölfel die Methoden und Algorithmen für die Signalanalyse inklusive der strukturellen Begutachtung (structural assessment).

1.5.5 WindMW

Innerhalb des Forschungsvorhabens hat WindMW Service GmbH seine umfassende historische Datenbasis aus Messdaten zum Verformungsverhalten an Grout-Verbindungen unter Berücksichtigung des statischen und dynamischen Tragstrukturverhaltens weiter analysiert. Die Datenformate aus dem SHM-System für das Grout-Monitoring und dem SCADA System für die Betriebsdaten wurden miteinander vernetzt und nach entsprechender Konditionierung den Projektpartnern bereitgestellt.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Identifikation von robusten Indikationen für die Beurteilung von langfristigen Trends der gemessenen Relativverschiebungen in der Grout-Verbindung zwischen Monopile und Transition Piece, hinsichtlich Sensitivität und Abhängigkeit der aufgezeichneten Messsignale, von der jeweiligen Lokation der OWEA im Windpark.

Des Weiteren wurden in Offshore-Einsätzen die Grout-Verbindungen auf ihre strukturelle Integrität hin wiederholt untersucht. Die Ergebnisse aus diesen Überprüfungen sind zusammen mit den Ergebnissen

der Permanentüberwachung in ein weiterentwickeltes Konzept für die wiederkehrende Prüfung der Grout-Verbindungen eingeflossen.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Weiteren soll auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises eingegangen werden:

- Die Personalkosten für die Projektmitarbeiter sind der mit Abstand größte Posten. Durch die Corona-Pandemie entstand ein größerer Personalaufwand als geplant. Die benötigten Mittel konnten durch einen Minderbedarf in den Reisekosten und unmittelbaren Vorhabenkosten abgefangen werden.
- Die geplanten Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen wurden für Lizenzen und Wartung von Abaqus mit zugehörigen Toolboxen aktiviert.
- Die Reisekosten fielen um die Hälfte geringer aus als ursprünglich geplant. Grund hierfür war die Corona-Pandemie mit den einhergehenden Kontakt- und Reisebeschränkungen sowie die Umwandlung von geplanten Präsenztreffen in Online-Meetings. Die freiwerdenden Mittel wurden in Personalkosten umgewidmet.
- Als Material wurden Sensoren für den Versuchsaufbau im TTH beschafft.
- Der Großteil der geplanten sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten war für Lizenzen der Simulationssoftware Abaqus geplant. Hiervon wurden jedoch nur 10 % benötigt. Die freiwerdenden Mittel wurden für den entstandenen Mehraufwand bei den Personalkosten aufgewendet.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Bearbeitung der Arbeitspakete wurde von hochqualifizierten Mitarbeitern des Geschäftsfelds WEA und MONS effektiv, ziel- und ergebnisorientiert durchgeführt. Die Vorhabenziele wären ohne Förderung nicht erreicht worden.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die neuen Sensoren von MIOPAS zur Schadensdetektion im Grout erwiesen sich im Projekt sowohl in den Laborversuchen als auch im Großversuch als wichtige Informationsquelle für den Erkenntnisgewinn zum Schädigungsprozess im Grout. Die Experimente zeigten jedoch auch, dass das Sensorsystem in dieser Form für eine Installation unter Offshore-Bedingungen nicht geeignet ist. Dehnungsmessungen außen am Transition Piece zeigten in den Versuchen eine gute Korrelation zur Schädigungsentwicklung im Grout. Dies kann in zukünftigen Monitoringkonzepten berücksichtigt werden, auch wenn der Installationsaufwand kritisch abgewogen werden muss.

Das gewonnene Know-how zur Lastrekonstruktion ermöglicht eine Reduktion der für ein windparkübergreifendes Fundamentmonitoring notwendigen Sensoranzahl. Zusammen mit der im Projekt entwickelten Schadenserkennung für Groutfugen liefern die Projektergebnisse einen Mehrwert für zukünftige Konzepte zur Überwachung von Offshore-Fundamenten mit Groutverbindungen.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind dem ZE keine wesentlichen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung des Vorhabens bekannt geworden.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6

Zeitschriftenartikel

TSIAPOKI, Stavroula ; COLOMER SEGURA, Carles ; EBERT, Carsten: *Schwingungsbasierte Lastrekonstruktion an Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen*. In: *Bautechnik* (2022), Nr. 6, S. 477–484

NUBER, Andreas ; BORGELT, Jakob ; COLLMANN, Mareike ; DREGER, Dennis ; FRIEDMANN, Herbert ; KOHLMEIER, Marin ; SCHOSSIG, Tobias ; RÖMGENS, Niklas ; TSIAPOKI, Stavroula ; WERNITZ, Stefan: *Untersuchung des Tragverhaltens von Offshore-Grout-Verbindungen unter Wasser*. In: *Schiff&Hafen* (2024), Nr. 5, S. 36–42

Konferenzbeiträge

NUBER, Andreas ; BORGELT, Jakob ; COLLMANN, Mareike ; DREGER, Dennis ; FRIEDMANN, Herbert ; KOHLMEIER, Martin ; SCHOSSIG, Tobias ; TSIAPOKI, Stavroula ; WERNITZ, Stefan: *Grout-WATCH - Untersuchung des Tragverhaltens von Offshore-Grout-Verbindungen unter Wasser an Tragstrukturen mit dynamischen Wechsellasten*. In: Projektträger Jülich (Hrsg.): *Tagungsband der Statustagung 2023*, 2023, S. 151–168

III. Literaturverzeichnis

- [1] VDI Richtlinie 4551. Januar 2020. *Strukturüberwachung und -beurteilung von Windenergieanlagen und Offshorestationen*
- [2] KOHLMEIER, Martin ; HEINRICH, Dariya ; SPILL, Severin ; COLLMANN, Mareike ; DREGER, Dennis ; SCHOSSIG, Tobias: *Design of a Large-scale Model Test to Validate Monitoring Systems for Grouted Connections in Offshore Monopile Foundations*. In: CHUNG, Jin S. (Hrsg.): *The Proceedings of the Thirty-third (2023) International Ocean and Polar Engineering Conference : ISOPE-2023*. Cupertino, California, USA : International Society of Offshore and Polar Engineers, 2023, S. 920–926
- [3] NUBER, Andreas ; BORGELT, Jakob ; COLLMANN, Mareike ; DREGER, Dennis ; FRIEDMANN, Herbert ; KOHLMEIER, Martin ; SCHOSSIG, Tobias ; TSIAPOKI, Stavroula ; WERNITZ, Stefan: *Grout-WATCH - Untersuchung des Tragverhaltens von Offshore-Grout-Verbindungen unter Wasser an Tragstrukturen mit dynamischen Wechsellasten*. In: Projektträger Jülich (Hrsg.): *Tagungsband der Statustagung 2023*, 2023, S. 151–168
- [4] API Specification 2GEO/ISO 19901-4:2003 (Modified). 2011-04-01. *Geotechnical and Foundation Design Considerations*