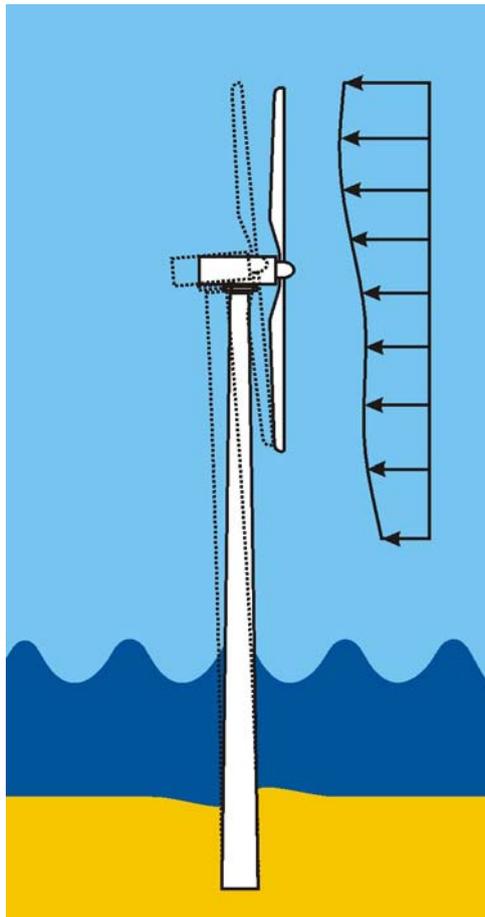


# Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Mess- daten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2

## „GIGAWINDplus“

Förderkennzeichen: 0329944

### Abschlussbericht 2004 – 2006



September 2007

Forschungsvorhaben: **Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2 (GIGAWINDplus)**

Zahlungsempfänger: **Leibniz Universität Hannover**

Förderkennzeichen: **0329944**

Laufzeit des Vorhabens: **01.04.2004 – 31.03. 2007**

Berichtszeitraum: **01.04.2004 – 31.03. 2007**

Projektträger: **PTJ, Forschungszentrum Jülich GmbH**

**gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit**

**Beteiligte Institute:**

**Institut für Strömungsmechanik** und Elektronisches Rechnen im Bauwesen,  
Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. W. Zielke (Projektkoordination)

**Institut für Statik und Dynamik**,  
Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. R. Rolfes

**Institut für Stahlbau**  
Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann

**Institut für Grundbau** und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau,  
Universität Duisburg-Essen, Prof. Dr.-Ing. W. Richwien

## Vorbemerkungen

Dieser Forschungsbericht fasst die Arbeitsergebnisse zusammen, die in der Forschungsgruppe GIGAWIND vom 01. April 2004 bis zum 31. März 2007 erzielt wurden. Dies ist die Laufzeit des vom BMU unter der Kurzbezeichnung „GIGAWIND*plus*“ geförderten Projekts, das den vollständigen Namen „*Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden von Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2*“ trug. Dieser Titel beschreibt treffend die Zielsetzung des Projekts. Es wurden Modelle weiterentwickelt und durch Messdaten von Messplattformen validiert. Zu Beginn standen die Messungen an der Forschungsplattform FINO 1 im Vordergrund. Im Einvernehmen mit dem BMU und dem Projektträger Jülich wurden später auch Messungen am Windmessmast Amrumbank West durchgeführt und für die Modellvalidierung herangezogen. Dieser Messmast stellt durch seine Konstruktion als Monopile eine gute Ergänzung zu der Jacketkonstruktion von FINO 1 dar. Die bei der Antragstellung beabsichtigte Verwendung von Messungen an der Plattform FINO 2 konnte im Förderungszeitraum nicht durchgeführt werden, da diese Plattform zu spät fertiggestellt wurde.

Der Vermittlung der Forschungsergebnisse an die Praxis wurde eine große Bedeutung beigemessen und durch die Veranstaltung von Symposien, durch Jahresberichte sowie durch zahlreiche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und auf Kongressen erfolgreich umgesetzt.

Die Reihe der bisher fünf GIGAWIND-Symposien begann schon im Jahre 2001 und wurde zu einem etablierten Forum für die Themen Tragkonstruktion und Gründung von Offshore-WEA. Traditionell stammen etwa die Hälfte der Beiträge aus der Forschungsgruppe selbst und die andere Hälfte von eingeladenen Referenten. Innerhalb der Projektlaufzeit fanden zwei Symposien statt, im Herbst 2005 und im Frühjahr 2007. Es konnten jeweils fast 200 Teilnehmer begrüßt werden, wobei die externen Teilnehmer ganz überwiegend von Ingenieurbüros, Herstellern und Zertifizierern kamen, zum kleineren Teil aus Hochschulen und wissenschaftlichen Einrichtungen. Dies zeigt, dass es der Forschungsgruppe GIGAWIND gelang, die beabsichtigte Zielgruppe zu erreichen. Die Konferenzbeiträge wurden jeweils nach den Symposien weiteren Interessenten über die Webseite [www.gigawind.de](http://www.gigawind.de) verfügbar gemacht.

Diese Webseite unterrichtet darüber hinaus kontinuierlich über Arbeitsergebnisse der Gruppe und bietet zahlreiche Veröffentlichungen als Download an. Ebenso stehen hier die sechs sehr ausführlichen Jahresberichte zur Verfügung, drei für das Projekt GIGAWIND (2001 – 2003) und drei für GIGAWIND*plus* (2004 – 2006).

Angesichts dieser umfangreichen bereits zugänglichen Veröffentlichungen ist dieser Abschlussbericht bewusst knapp gehalten. Er setzt sich aus fünf Kapiteln zusammen:

Das erste Kapitel gibt eine Übersicht über die Messungen an der Plattform FINO 1 und dem Messmast Amrumbank West, die z.T. von der Gruppe selbst durchgeführt wurden. Sie gingen wesentlich in die Forschungstätigkeit der Gruppe ein.

Die weiteren vier Kapitel befassen sich mit den Hauptthemen der Gruppe, im Einzelnen:

- Seegang, Seegangslasten, sowie die Überlagerung von Wind- und Wellenlasten,
- Weiterentwicklung und Validierung dynamischer Strukturmodelle,
- Berechnungsmethoden und Bemessungskonzept für die Gründung,
- Lebensdaueranalysen auf der Basis dynamischer Strukturmodellierung.

Zum Abschluss des Projekts ist es den Mitgliedern von GIGAWIND ein wichtiges Anliegen, ihren Dank für die finanzielle Unterstützung durch das BMU zum Ausdruck zu bringen, und für die immer gute Betreuung durch den Projektträger Jülich. Darüber hinaus geht der Dank an die vielen Fachleute, die auf den Symposien und in zahllosen persönlichen Gesprächen ihr Interesse an der Arbeit bekundet, Anregungen gegeben und insgesamt die Motivation der Beteiligten gestärkt haben.

Hannover, im August 2007

## Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen.....	I
1 Messungen an Referenzobjekten.....	1
1.1 Vorstellung der Referenzobjekte.....	1
1.2 Strukturmessungen an der Forschungsplattform FINO 1 .....	2
1.3 Strukturmessungen am Messmast Amrumbank West.....	3
1.4 Seegangsmessungen.....	4
2 Seegangs- und Wellenlasten .....	6
2.1 Ausgangslage und Zielsetzung.....	6
2.2 Kinematik nichtlinearer und unregelmäßiger Wellen.....	6
2.3 Seegangsmodelle mit Richtungsseegang .....	7
2.4 Lastansätze für schlanke Strukturen.....	7
2.5 Validierung von WaveLoads.....	7
2.6 Vergleich von Seegangsmessungen mit Boje und Radar.....	8
2.7 Korrelation zwischen Wind und Wellen.....	9
2.8 Analyse von Daten und Modellvalidierung an Plattform FINO 1 .....	10
2.9 Analyse von Daten am Messmast Amrumbank West.....	11
3 Tragstruktur-Gründung .....	12
3.1 Ausgangslage und Zielsetzung.....	12
3.2 Bemessungskonzept.....	12
3.3 Einbeziehung zyklischer Elementversuche - Elementverhalten .....	14
3.4 Ermittlung der Verformungsentwicklung – Übertragung des Elementverhaltens auf das Systemverhalten .....	15
4 Validierte Strukturmodelle und Systemidentifikation .....	18
4.1 Ausgangslage und Zielsetzung.....	18
4.2 Zeitreihenanalyse und Systemidentifikation.....	18
4.2.1 Spektralanalyse „FINO 1“ und „Amrumbank“.....	18
4.2.2 Autoregressive Modelle in der Systemidentifikation.....	20
4.2.3 Systemidentifikation am Messmast „Amrumbank West“ .....	20
4.3 Validierung der numerischen Strukturmodelle .....	21
4.3.1 Sensitivitätsanalysen an Referenzobjekten .....	22
4.3.2 Validiertes Rechenmodell „FINO 1“ .....	23
4.3.3 Validiertes Rechenmodell „Amrumbank West“ .....	24

---

5	Tragstruktur – Lebensdaueranalysen und Prognoseverfahren .....	25
5.1	Ausgangslage und Zielsetzung.....	25
5.2	FINO-Messdaten .....	25
5.3	Strukturmodellierung .....	26
5.4	Richtungsseegang.....	28
6	Literaturverzeichnis.....	30
6.1	Veröffentlichungen der GIGAWIND-Mitglieder auf dem Gebiet der Offshore- Windenergie .....	30
6.2	Sonstige Literatur .....	36
6.3	Software .....	41

# 1 Messungen an Referenzobjekten

## Verfasser des Kapitels:

Haake, G.<sup>1</sup>, Gerasch, W.-J.<sup>1</sup>, Rolfes, R.<sup>1</sup>, Kossel, T.<sup>2</sup>, Zielke, W.<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Institut für Statik und Dynamik, <sup>2</sup>Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover)

## 1.1 Vorstellung der Referenzobjekte

Zur Validierung der im Projekt entwickelten bautechnischen Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen stehen den Projektpartnern Messdaten von zwei Referenzobjekten in der Nordsee zur Verfügung (siehe Bild 1-1). Dies ist zum einen die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderte Forschungsplattform „FINO 1“, die im Juli 2003 etwa 45 km nördlich der Insel Borkum (N 54°00'86" O 6°35'26") in 28 m Wassertiefe mit Jacket-Gründung errichtet worden ist. Als weiteres Referenzobjekt haben die Projektpartner Zugriff auf Strukturmessdaten des von der E.ON Energie AG errichteten Messmastes „Amrumbank West“. Dieser ist mit Monopilegründung im April 2005 etwa 35 km westlich der Insel Amrum in der Nordsee (N 54°30'47" O 7°42'04") installiert worden. Beide Standorte sind in Bild 1-2 markiert.

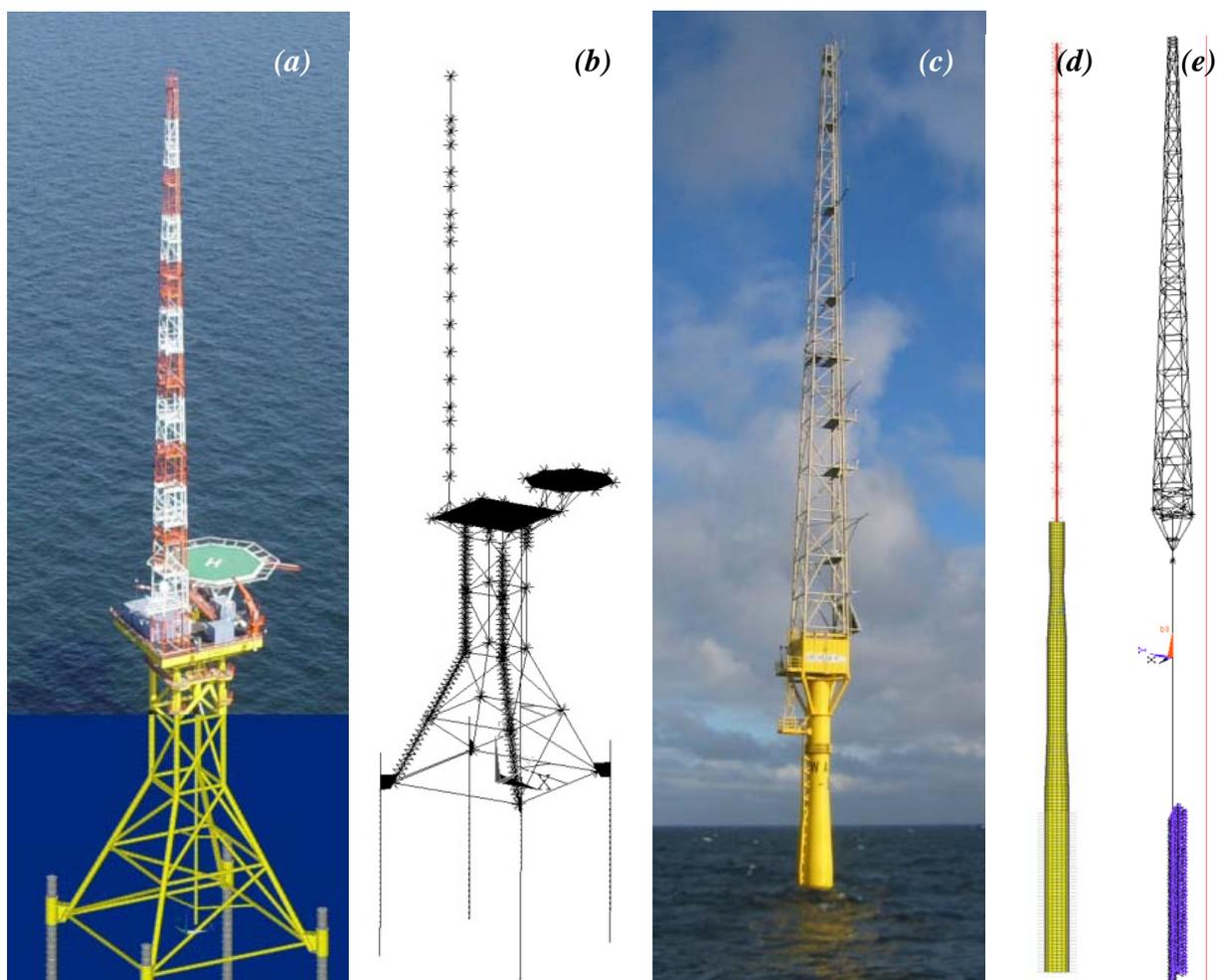


Bild 1-1: Referenzobjekte: (a) Forschungsplattform FINO 1; (b) FE-Modell FINO 1; (c) Messmast Amrumbank West; (d) FE-Modell, Monopile aus Schalenelementen (ISD); (e) FE-Modell aus Balkenelementen (ISEB)

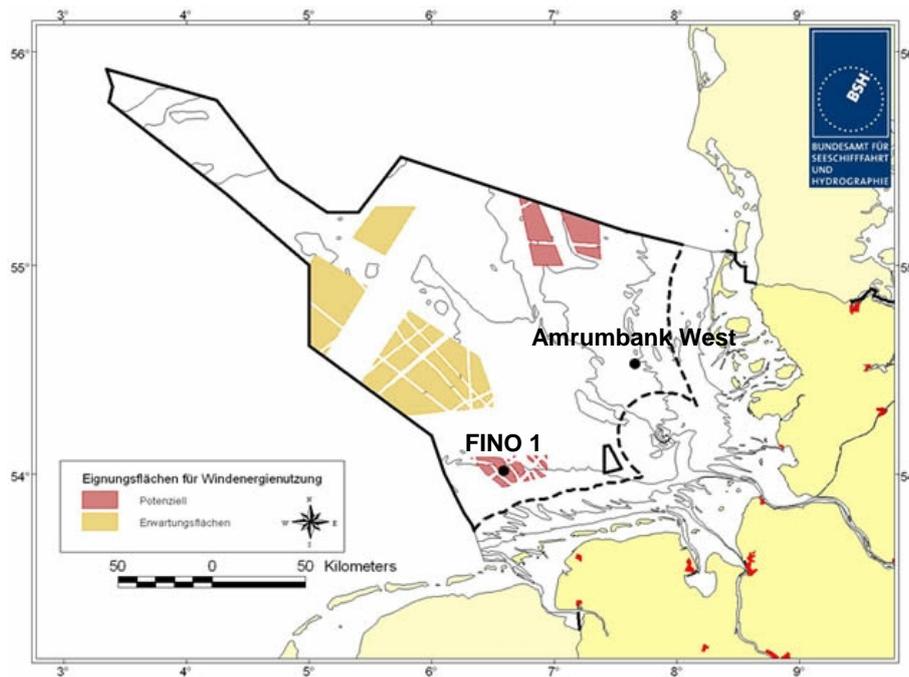


Bild 1-2: Standorte der Forschungsplattform FINO 1 und des Messmastes Amrumbank West

## 1.2 Strukturmessungen an der Forschungsplattform FINO 1

Die Forschungsplattform FINO 1 ist mit 44 Dehnungsaufnehmern und 10 Beschleunigungsaufnehmern bestückt, welche mit einer Abtastfrequenz von 10 Hz ausgelesen werden. Aufgrund der Überdimensionierung der Struktur liegen die Dehnungs- und Spannungsamplituden auch bei starker Wellenbelastung (22.12.2003) nur bei

$$\Delta\varepsilon = 20 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \quad \Rightarrow \quad \Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon = 4,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (1)$$

Bezogen auf die Streckgrenze von Stahl sind dies nur 1,17%. Die Auslastung infolge statischer Lasten ist vermutlich wesentlich geringer und wird grundsätzlich über den Offset aus den Messschrieben herausgefiltert. Grund für die Überdimensionierung ist die Verformungsbegrenzung (maximale Kopfauslenkung auf OK Plattformdeck unter der 100-Jahres-Bemessungswelle und der Bemessungsböe: +/- 150 mm [Ausführungsstatik FINO 1]).

Die Anordnung des Messsystems kann Bild 1-3 entnommen werden. Es sind jeweils vier Dehnungsaufnehmer in Umfangsrichtung in gleichmäßigem Abstand vorhanden, die bei gemeinsamer Betrachtung Rückschlüsse auf den Normalkraft- und Biegeanteil zulassen. Da aufgrund der geringen Auslastung mit einer ebenen Spannungsverteilung im Querschnitt zu rechnen ist, liegt mit vier Messpunkten ein 1-fach überbestimmtes System vor, bzw. bietet sich eine Kontrollmöglichkeit. Im Jahresbericht 2004, Abschnitt 4.4.5 wird aufgezeigt, dass der Fehler bei etwa 8% bis 12% der maximalen Spannung liegt und sich phasenverschoben zu den Einzelmessstellen verhält. Die Berechnung der Hauptlastrichtung sowie des Hauptmomentenanteils ist ebenfalls diesem Abschnitt zu entnehmen.

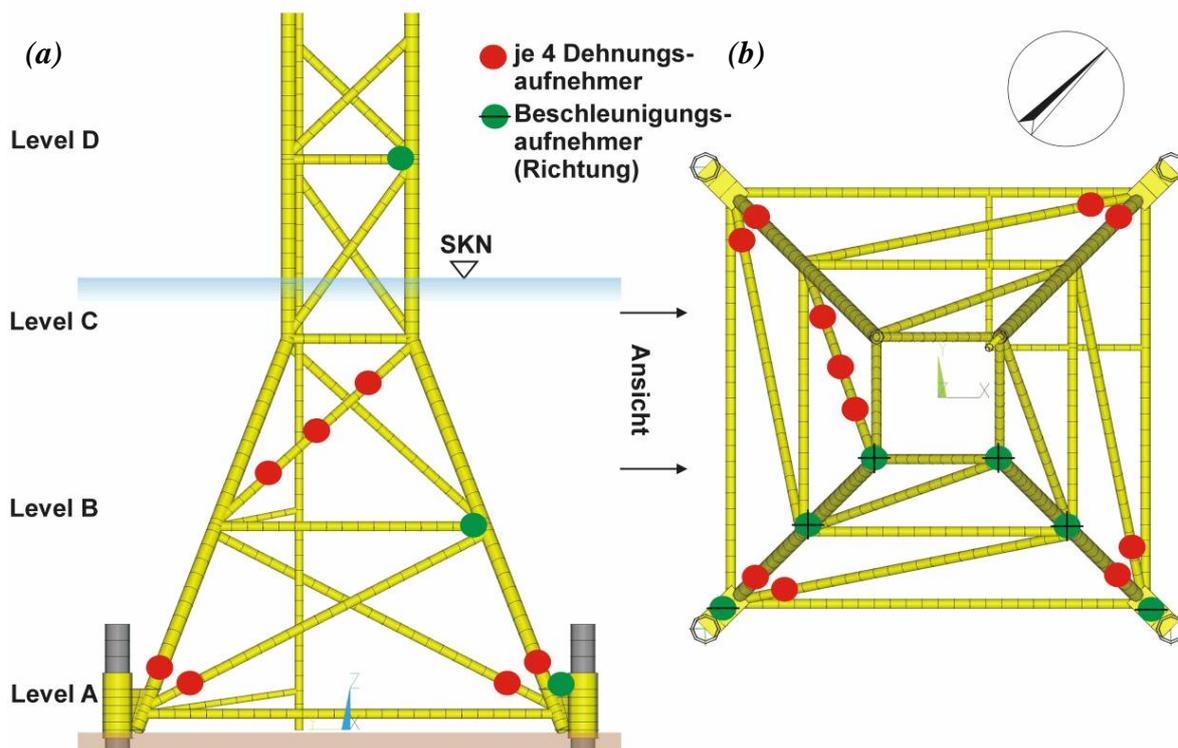


Bild 1-3: Anordnung der Strukturaufnehmer an FINO 1; (a) Südwest Ansicht, (b) Draufsicht

Das Messsystem auf FINO 1 liefert Messdaten seit Ende 2003. Während ein DMS seit Beginn ausgefallen ist zeigen die übrigen Kanäle zu über 80% sehr aussagekräftige Signale. Die insbesondere in der zweiten Hälfte des Jahres 2006 verschlechterten bzw. ausgefallenen Signale konzentrieren sich auf wenige Querschnitte, so dass vermutet wird, die Kabelkanäle könnten undicht geworden oder beschädigt worden sein. Ungünstiger stellt sich die Situation bei den Beschleunigungssensoren am Jacket dar: Hier sind zweieinhalb Jahre nach der Installation sämtliche Signale verrauscht, wobei die Sensoren in der größten Wassertiefe schon nach etwa einem Jahr ausgefallen sind und die am höchsten angeordneten Sensoren am längsten überdauert haben.

### 1.3 Strukturmessungen am Messmast Amrumbank West

Der Messmast Amrumbank West ist mit 12 Dehnungskanälen und 10 Beschleunigungskanälen bestückt, welche getriggert durch Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe mit einer Abtastfrequenz von 20 Hz ausgelesen werden. Die Anordnung der Sensoren ist Bild 1-4 zu entnehmen. Der Monopile ist an sechs Querschnitten mit je vier DMS versehen, von denen die gegenüberliegenden zu Vollbrücken zusammengeschlossen sind. Drei Dehnungskanäle sind aufgrund von Ausfällen als Halbbrücke geschaltet.

80% der Sensoren haben den Installationsvorgang des im April 2005 in Betrieb genommenen Messmastes Amrumbank West überstanden. Angesichts der Tatsache, dass ein Großteil des Messsystems beim Rammen des Monopiles bereits eingebaut war, ein zunächst gutes Ergebnis. Die Beschleunigungssignale, insbesondere zwei nachträglich installierte Sensoren, zeigen dann auch sowohl im Zeit- als auch im Frequenzraum ausgesprochen klare Verläufe. Bereits innerhalb des siebten bis neunten Monats nach der Installation stellte sich allerdings eine Verrauschung aller Beschleunigungssignale ein. Die Dehnungsmessungen zeigten sich von Beginn an zu den

Beschleunigungsmessungen nicht konsistent. Zudem fielen einige Kanäle ganz aus, andere lieferten so stark abweichende Signale, dass auf Messfehler geschlossen werden muss.

Aufgrund der besonderen Beanspruchung während des Rammvorgangs ist die Empfindlichkeit der piezoelektronischen Beschleunigungssensoren mit etwa 7,2 mV/g sehr gering gewählt worden. Für Strukturen mit kleinen Verformungen (die Pfahlkopfamplitude beträgt in einer Starkwindphase etwa 11 mm) werden jedoch üblicherweise Sensoren mit 100-facher Empfindlichkeit verwendet, die allerdings nicht rammtauglich sind. Bei den verwendeten unempfindlicheren Sensoren könnte eintretendes Wasser, das nie ganz vermieden werden kann, ein Rauschen verursacht haben, das die eigentlichen Signale vollständig überlagert.

Für spätere Anwendungsfälle muss das Messsystem dahingehend optimiert werden, dass es Anforderungen während des Rammvorgangs ebenso gewachsen ist wie den Witterungseinflüssen im Dauerbetrieb. Die Empfindlichkeit der Sensoren muss so hoch sein, dass die aufgezeichneten Signale gegenüber dem Grundrauschen dominieren.

#### 1.4 Seegangsmessungen

An beiden Standorten – FINO 1 und Amrumbank West – wurden die Seegangsmessungen jeweils mittels einer Boje durchgeführt. Auf der Plattform FINO 1 wurde zusätzlich ein Wellenradar installiert, um die beiden Verfahren vergleichen und bewerten zu können. In Bild 1-5 ist die Anordnung beider Messeinrichtungen an der Plattform FINO 1 zu sehen. Diese Messungen wurden durch die Gruppe GIGAWIND geplant und vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt.

Für die Bojenmessungen kamen Seegangsbojen vom Typ Datawell WAVEC zum Einsatz. Gemessen werden halbstündlich die signifikanten Seegangparameter sowie ein eindimensionales Wellenspektrum. Die Wellenhöhe wird im Bereich von 0,2 – 40 m in Schritten von 0,01 m gemessen, die Periode im Bereich von 1,6 – 30 s in Schritten von 0,1 s. Die Schritte für die gemessene Wellenrichtung betragen 1,5°. Der Frequenzbereich des Spektrums liegt zwischen 0,03 und 0,5 Hz.

Als Seegangsradar wird ein WaMoS-Radarmessgerät verwendet, das an der Nordecke der Plattform FINO 1 angebracht ist und über einen Bereich von 270° misst. In Abständen von zehn Minuten wird der Zeitraum der vorangegangenen halben Stunde ausgewertet, um die signifikanten Parameter zu bestimmen. Gemessen werden dabei Wellenhöhen ab 0,5 m in Schritten von 0,1 m. Der Messbereich für die Peakperiode liegt bei 3,5 – 40 s mit Schritten von

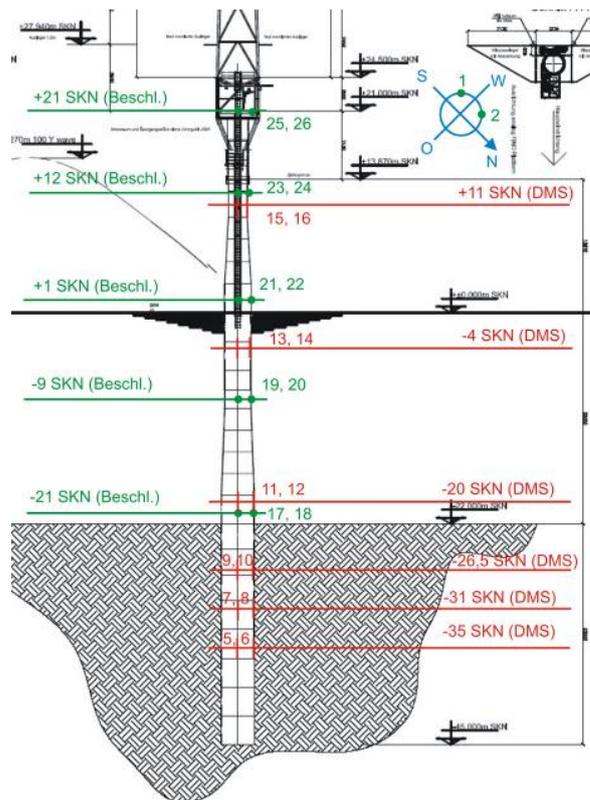


Bild 1-4: Messmast Amrumbank West: Anordnung der DMS 5 bis 16 sowie der Beschleunigungssensoren 17 bis 26

0,1 s. In Schritten von 4° wird jeweils ein Spektrum mit 64 Frequenzen für den Bereich von 0,006 bis 0,35 Hz erstellt.

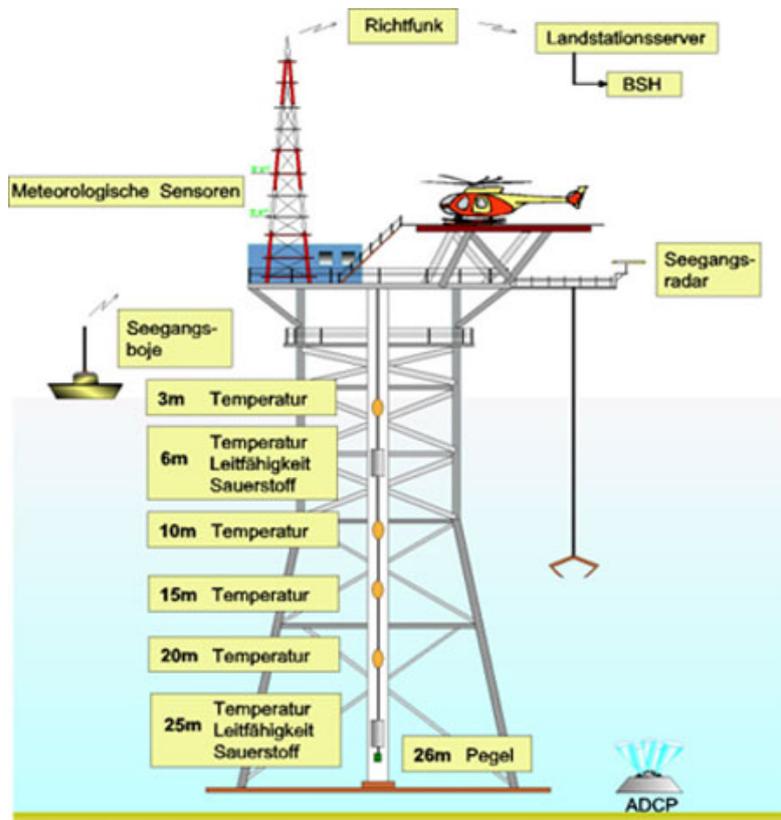


Bild 1-5: Messgeräteanordnung auf Plattform FINO 1

## 2 Seegangs- und Wellenlasten

### *Verfasser des Kapitels:*

Zielke, W., Kossel, T. und Kohlmeier, M. (Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover)

### 2.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die bisher eingesetzten Methoden zur Berechnung von Wellenlasten gehen von nichtlinearen Wellentheorien für sehr hohe Wellen und von unregelmäßigen aber linearen Wellen zur Untersuchung der Strukturermüdung aus. In beiden Fällen haben die Wellen nur eine Richtung, sind also langkämmig. Das Projekt setzte sich zum Ziel, langkämmige unregelmäßige Wellenzüge auch nichtlinear zu berechnen und die Kurzkämmigkeit des Seegangs wenigstens für lineare Wellen zu berücksichtigen. Die Methoden sollten in das schon im Vorläuferprojekt GIGAWIND begonnene Computerprogramm WaveLoads implementiert werden, und dieses sollte für langkämmigen Seegang an Hand von Messungen aus dem Großen Wellenkanal in Hannover validiert werden. Für kurzkämmigen Seegang waren die Naturmessungen von FINO 1 hinzuzuziehen.

Seegangsmessungen werden mit Wellenbojen und in selteneren Fällen auch mit Radar durchgeführt. An der Plattform FINO 1 wurde beides eingesetzt. Es gab die selten zu nutzende Möglichkeit, eine vergleichende Bewertung beider Methoden hinsichtlich ihrer Genauigkeit durchzuführen und zwar konkret für die Lokationen in der Nordsee, wie sie für die größeren Windparks vorgesehen sind.

Die Korrelation von Wind und Wellen bei der Lastermittlung ist in den gegenwärtigen Richtlinien noch nicht konkret vorgegeben. An der Plattform FINO 1 wurde beides gemessen, so dass sich die Aufgabe stellte, mit theoretischen Methoden aus den Messungen Empfehlungen zur Wind- und Wellenüberlagerung abzuleiten.

An den Tragstrukturen der Plattform FINO 1 und des Messmastes Amrumbank West wurden sowohl Wellen und Wind, als auch Spannungen und Dehnungen gemessen. Somit ergab sich die Chance und die besondere Herausforderung, die entwickelten Modelle der Lastansätze zu validieren, indem die Reaktionen der Gesamtstruktur berechnet und mit den Messungen verglichen werden. Hierzu waren die umfangreichen Daten zu analysieren, eine Kopplung von WaveLoads mit Modellen der Strukturmechanik (ANSYS, MSC.Nastran) vorzunehmen sowie die gekoppelten Berechnungen durchzuführen.

### 2.2 Kinematik nichtlinearer und unregelmäßiger Wellen

Stochastische Seegangssimulationen für die Lastermittlung werden meist mit dem Verfahren der linearen Superposition von „Airy-Wellen“ durchgeführt. Dabei werden einzelne lineare Wellen verschiedener Amplituden und zufälliger Phasen überlagert (Mittendorf et al., 2002). Dieses führt zu Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung, welche vergleichbare statistische Eigenschaften aufweisen wie Naturmessungen. Eine exakte Reproduktion gemessener Zeitreihen kann mittels dieses Modellansatzes jedoch nicht erreicht werden, und Vergleiche zwischen Simulationsergebnissen und Messungen sind nur im Frequenzbereich möglich. Zudem bleiben bei der linearen Superposition nichtlineare Welleneffekte unberücksichtigt. Fehler in den kinematischen und dynamischen Randbedingungen werden bei der Überlagerung recht groß und können zu einer unrealistischen Wasserpartikelkinematik führen und damit mittels Morison-

Ansatz (Morison et al., 1950) zu unrealistischen Wellenlasten. Für die Beurteilung der gemessenen Seegangslasten z.B. von FINO 1 war es erforderlich, ausgehend von der aufgezeichneten Wasserspiegelauslenkung (im Zeitbereich) auf die wellenkinematischen Größen und damit auf die Lasten schließen zu können. Dies wurde mit der softwaremäßigen Realisierung und Erprobung der lokalen Fourier Approximation (LFA) nach *Sobey (1992)* erreicht. Somit kann jetzt auch die Kinematik unregelmäßiger Wellenzüge nichtlinear berechnet werden.

### 2.3 Seegangsmodelle mit Richtungsseegang

Für Dauerfestigkeitsuntersuchungen von OWEA kommen Modelle unregelmäßiger Wellen zum Einsatz. Sie basieren bisher fast ausschließlich auf der Überlagerung von Wellen nur einer Richtung (1D-Seegangssimulation), d.h. der Annahme eines langkämmigen Seegangs. Schon (*Forristal et al., 1978*) haben durch Analyse von Naturmessdaten gezeigt, dass die Berücksichtigung der Richtungsverteilung des Seegangs einen noch größeren Einfluss auf die Wasserpunktkinematik haben kann als die Nichtlinearität. Diese Kurzkämmigkeit des Seegangs kann mathematisch durch Überlagerung mehrerer einzelner linearer Wellen aus verschiedenen Richtungen beschrieben werden (2D-Seegangssimulation).

Es konnte gezeigt werden, dass bei der Seegangslastsimulation die Berücksichtigung der Richtungsstruktur des Seegangfeldes einen wesentlichen Einfluss auch auf die resultierenden Gesamtlasten hat. Sie wird durch das Richtungsspektrum beschrieben, welches sich aus der Multiplikation eines Energiedichtespektrums mit einer Richtungsfunktion ergibt. Durch Parametrisierungen ermöglicht die Richtungsfunktion, den Grad der Streuung zu berücksichtigen. Der so genannte Spreading-Parameter  $S$  beeinflusst das Wellenfeld so, dass z. B. folgende Seegangscharakteristika abgebildet werden können:  $S = 10$  Wind-Wellen;  $S = 25$  Dünung mit kurzer Verfallsdauer;  $S = 75$  langkämmiger Seegang.

Durch die Berücksichtigung der Seegangsstreuung verringern sich die absoluten Beträge der horizontalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen gegenüber einer 1D-Rechnung. Weiterhin verändern sich die Angriffsrichtungen der Lasten. Infolge der geringeren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vermindern sich damit auch die Beträge der Lasten. Wie stark dieser Effekt ausgeprägt ist, hängt von der Wahl des Spreadingparameters ab, und damit von der Struktur des Seegangfeldes.

### 2.4 Lastansätze für schlanke Strukturen

Die im Projekt entwickelten Methoden sind auf sog. hydrodynamisch transparente Strukturen anwendbar, deren Durchmesser der Stäbe klein gegenüber der Wellenlänge ist (geringer als ca. 20%), so dass Wellen nahezu unverändert durch die Konstruktion laufen. Die typischen Strukturen von OWEA wie Monopile, Tripod, Jacket erfüllen diese Bedingung. Unter dieser Voraussetzung kann die Morison-Gleichung angesetzt werden. Aus Wellenkinematik, Stabgeometrie und empirischen Beiwerten werden die Kräfte für Stäbe unterschiedlicher Neigung und daraus die der Gesamtstruktur bestimmt. Wellenkinematik und Kräfte werden mit dem Computerprogramm WaveLoads berechnet.

### 2.5 Validierung von WaveLoads

Als Folge der im Projekt durchgeführten Weiterentwicklung enthält das Programm WaveLoads (*Mittendorf et al., 2005c*) nun insgesamt folgende Wellentheorien für den langkämmigen, ggf.

unregelmäßigen Seegang: Airy; Stokes 2, 3 und 5; Lagrangesches Wellenmodell; Dean Stromfunktion; Stromfunktion nach Fenton; Fourier Wellenmodell nach Sobey.

Der kurzkämmige unregelmäßige Seegang wird linear als Richtungsspektrum berechnet; zur Berechnung der resultierenden Wellenkräfte kommt die Morison-Gleichung zur Anwendung.

Da das Programm inzwischen in zahlreichen Ingenieurbüros eingesetzt wird, kommt seiner Validierung eine große Bedeutung zu. Sie erfolgte zunächst mit Hilfe von Laborversuchen zylindrischer Pfähle in dem Großen Wellenkanal des Forschungszentrum Küste. Dabei wurden regelmäßige und unregelmäßige Wellen betrachtet, sowie senkrechte und geneigte Pfähle (Oumeraci, 2004). Gemessen wurden Wasseroberfläche, Orbitalgeschwindigkeiten, Einspannmoment des Pfahls. Komplexe Tragstrukturen blieben den Naturmessungen z. B. an der Plattform FINO 1 vorbehalten (s.u.). Die Ergebnisse zeigten ein sehr befriedigendes Maß der Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung, aber auch die Abhängigkeit der Ergebnisse von den empirischen Beiwerten wird deutlich (GIGAWINDplus Jahresbericht 2004; Blümel, 2005).

## 2.6 Vergleich von Seegangsmessungen mit Boje und Radar

An der Forschungsplattform FINO 1 werden die Seegangparameter auf zweierlei Art gemessen, in 200 m Abstand durch eine Boje und an der nördlichen Ecke der Plattform durch ein WaMoS-Radarmessgerät. In einer Studie wurden speziell die Parameter signifikante Wellenhöhe, Peakperiode und mittlere Richtung, sowie die Richtungsverteilung (Spreading) verglichen (Blümel, Zielke, 2006). Die wesentlichen Ergebnisse sind:

Die Differenzen der gemessenen signifikanten Wellenhöhen sind teilweise erheblich höher als die von den Herstellern genannten Messtoleranzen (1% Boje; 0,5 m Radar), und zwar für den gesamten Bereich gemessener Wellen (Bild 2-1). Die Abweichung der Peakperiode liegt ab einer signifikanten Wellenhöhe von 2 m zu 90% innerhalb der angegebenen Messgenauigkeit von 1 s. Die Messung der mittleren Wellenrichtung der beiden Systeme stimmt für größere signifikante Wellenhöhen gut überein, größere Abweichungen gibt es nur im Bereich signifikanter Wellenhöhen von weniger als zwei Metern.

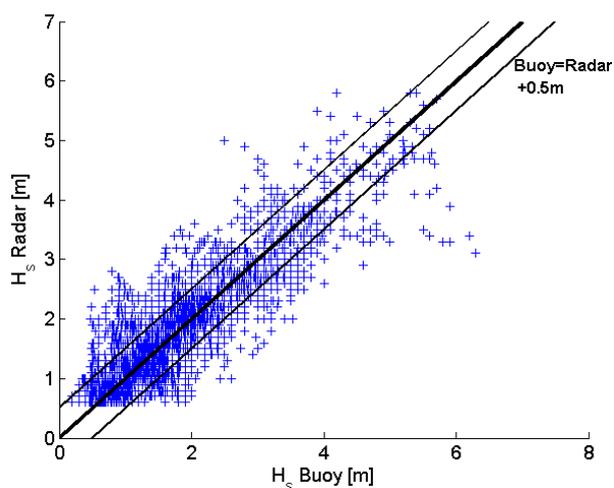


Bild 2-1: Scatterplot der sign. Wellenhöhen

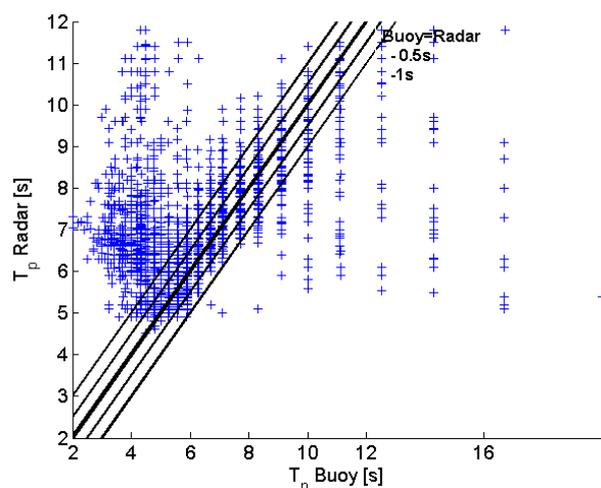


Bild 2-2: Scatterplot der Peakperioden

Im für die Anwendung relevanten Bereich liegen die Differenzen der von Boje und Radar gemessenen Werte für Richtung und Peakperiode somit im Rahmen der angegebenen

Messgenauigkeiten. Für die signifikante Wellenhöhe treten jedoch auch bei höheren Werten deutliche Unterschiede auf.

Der vom Radar gemessene Spreadingparameter zeigt einen Einfluss der Wellenrichtung, sowie bei niedrigem Seegang einen hohen Wert, während die Boje bei niedrigen Wellen eine geringere Richtungsverteilung misst.

Diese Aussagen sind von erheblicher Bedeutung für die Beurteilung der Genauigkeit von Modellen und Lastannahmen.

## 2.7 Korrelation zwischen Wind und Wellen

Während die momentanen Werte der Wasserspiegelauslenkung und der Windgeschwindigkeit als unkorreliert angesehen werden können, weisen mittlere Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe einen deutlichen Zusammenhang auf. Dieser wird in empirischen Wellenmodellen genutzt, so etwa zur Beschreibung des voll entwickelten Seegangs im Tiefwasser mittels Pierson-Moskowitz-Spektrum (*Chakrabarti, 1987*) und für flacheres Wasser mittels JONSWAP-Spektrum (*Hasselmann et al., 1973*).

Es ist ein parametrisiertes Modell zur Bestimmung der gemeinsamen Verteilungsfunktion von signifikanten Wellenhöhen, mittleren Wellenperioden und Windgeschwindigkeiten ausgehend von Naturmessdaten erstellt worden. Die am Standort FINO 1 simultan gemessenen Wind- und Wellendaten wurden mittels Regression an verschiedene Kurventypen angepasst, siehe Bild 2-3. Darüber hinaus wurden Spektralbeschreibungen dieses Seegangs verwendet und in Bild 2-4 den Messdaten gegenübergestellt, wobei das TMA-Spektrum die Wind-Seegangs-Ereignisse bestmöglich eingrenzt.

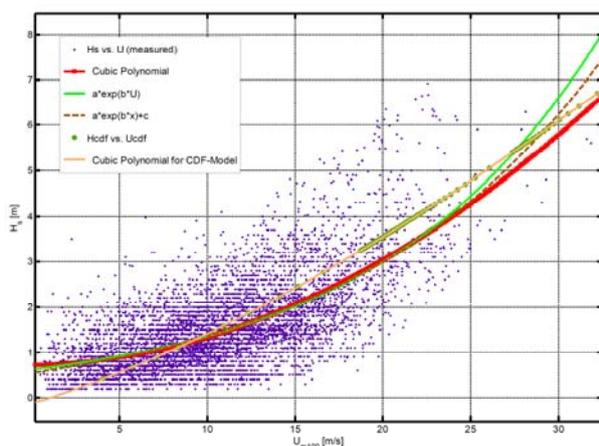


Bild 2-3: Vergleich gemessener Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen und der verwendeten Modellformulierungen

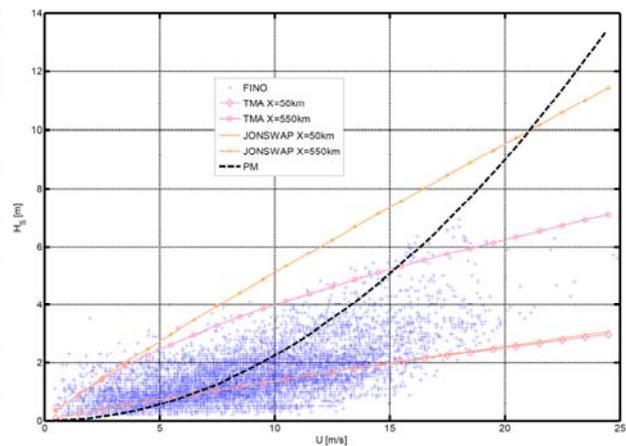


Bild 2-4: Darstellung der Korrelation von Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen am Standort FINO 1

Für die Validierung und Kalibrierung dieses Modellansatzes, insbesondere aber für eine verlässliche Extremwertextrapolation, für die die Betrachtung längerer Zeitreihen von Messdaten unerlässlich ist, wurden Hindcastdaten (*Mittendorf, Zielke 2004a*) für einen Zeitraum von 12 Jahren numerisch ermittelt. Daraus wurden wiederum signifikante Wellenhöhe und mittlere Windgeschwindigkeit ermittelt. Die für Messung und Hindcast ermittelten Ausgleichspolynome weisen mit steigender Windgeschwindigkeit zunehmende Abweichungen von maximal 16% auf.

## 2.8 Analyse von Daten und Modellvalidierung an Plattform FINO 1

Für die Seegangslastsimulation kommen vereinfachte FEM-Modelle aus Balkenelementen zum Einsatz. Aufbauten wie Container und Messeinrichtungen werden durch zusätzliche Massenpunkte idealisiert. Das FE-Modell der Forschungsplattform FINO 1 ist in *Mittendorf (2006)* ausführlich beschrieben und verifiziert, das Modell des Windmessmastes Amrumbank West entsprechend in *Kossel (2006)*. Der Vergleich mit den Messdaten erfolgt nach dem Prinzip der schädigungsäquivalenten Lastgrößen (vgl. *Böker et al. in GIGAWINDplus Jahresbericht 2005*).

Die Untersuchung stationärer Seegangszustände von vergleichbarer signifikanter Wellenhöhe  $H_s$  und Peakperiode  $T_p$  anhand von Messdaten der Plattform FINO 1 zeigt eine große Variabilität der schädigungsäquivalenten Lasten. In den Vertikalstreben sind zum Teil Abweichungen von über 100% zu beobachten. Die Unterschiede lassen sich vor allem auf unterschiedliche Wellenhauptrichtungen und Seegangsstreuungen zurückführen, die zu anders gelagerten Beanspruchungen in den Standbeinen der Jacket-Konstruktion führen. Ein Einfluss der mittleren Windgeschwindigkeit ist zwar bemerkbar, aber deutlich weniger signifikant.

Seegangslastsimulationen mit Berücksichtigung verschiedener Hauptwellenrichtungen können die aus den Messdaten ersichtliche unterschiedliche Beanspruchung der Struktur reproduzieren. 2D-Simulationen zeigen dabei eine bessere Übereinstimmung mit den Naturmessdaten als 1D-Simulationen, bei denen sich die jeweilige Angriffsrichtung übermäßig stark in den resultierenden Lasten abzeichnet (siehe Bild 2-5).

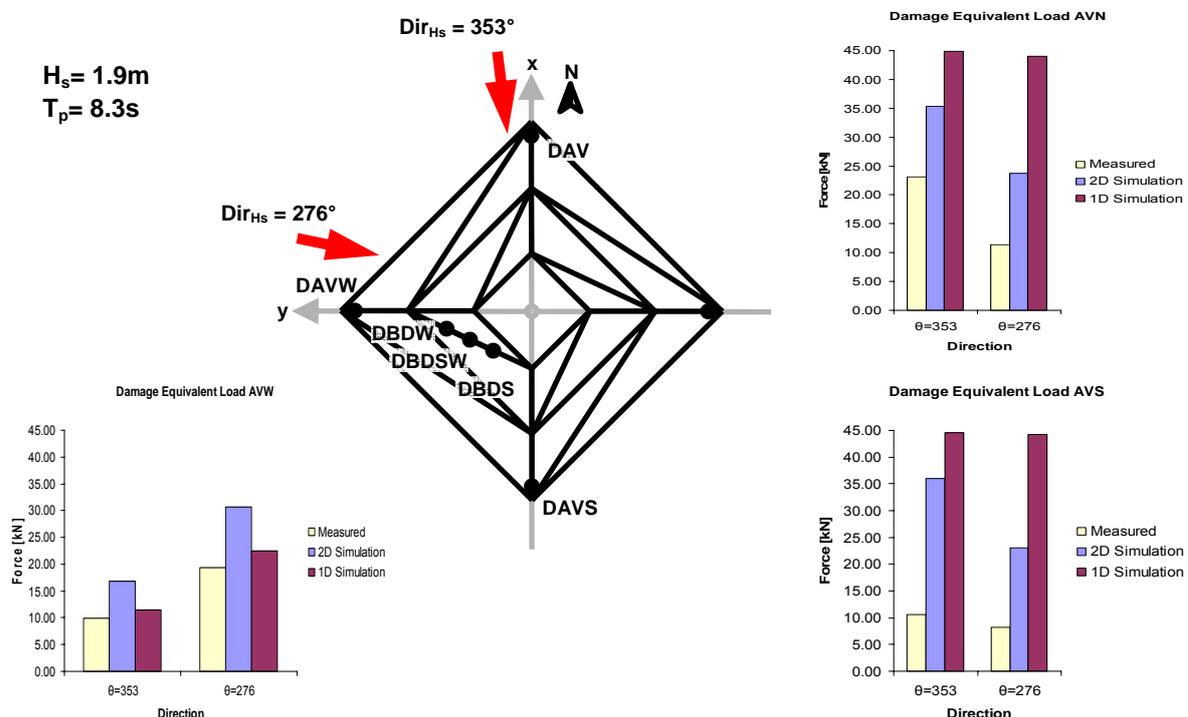


Bild 2-5: Simulierte und gemessene schädigungsäquivalente Lasten an den vertikalen Streben (AVN, AVS, AVW) der FINO-Plattform

Die Untersuchung der Variation der schädigungsäquivalenten Lastgrößen unter Änderung des Spreadings bei nahezu gleicher Hauptwellenrichtung zeigt, dass sich mit zunehmender Seegangsstreuung die resultierenden Lasten verringern. Dieses Verhalten lässt sich in den Naturmessungen beobachten und mit 2D-Seegangssimulationen angemessen wiedergeben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass 2D-Seegangssimulationen mit Berücksichtigung der Hauptwellenrichtung und der Seegangsstreuung zu den Ergebnissen aus den Naturmessungen eine gute Übereinstimmung zeigen und gegenüber 1D-Simulationen trotz erhöhten Rechenaufwandes eindeutig vorzuziehen sind.

## **2.9 Analyse von Daten am Messmast Amrumbank West**

Der Messmast Amrumbank West ist als Monopile-Struktur weniger strukturspezifischen Lastabtragungseffekten unterworfen als die aufgelöste Fachwerkstruktur der Plattform FINO 1. Damit lassen sich Richtungseffekte des Seegangs und der Strukturantwort besser analysieren.

Die Datenbasis der Messungen ist leider mit synchron vorliegenden Messungen von Seegang und Struktur in einem Zeitraum von insgesamt nur etwa 180 Tagen deutlich geringer als bei den Messungen an der Plattform FINO 1. Zudem gestaltet sich die Auswertung der Dehnungsmessungen schwierig, da einige Kanäle ganz ausgefallen sind, andere so stark abweichende Signale liefern, dass auf Messfehler geschlossen werden muss.

Ein Vergleich der gemessenen Seegangereignisse und Strukturantworten im Frequenzbereich zeigt, dass der dominierende Energieanteil der Strukturantwort im Bereich der Seegangenergie liegt. Ein zweiter deutlicher Peak ist im Bereich der von *Rolfes et al. (GIGAWINDplus Jahresbericht 2005)* identifizierten ersten Eigenfrequenz zu finden. Mit abnehmender signifikanter Wellenhöhe bildet sich ein Doppelpeak-Seegangsspektrum aus, das sich auch im Antwortspektrum wiederfindet. Ein Einfluss der Seegangsstreuung lässt sich in der spektralen Darstellung nicht erkennen.

Histogramme der Richtungshäufigkeiten der Frequenzkomponenten des Seegangsspektrums sowie derer der Hauptmomente lassen deutlich erkennen, dass die Richtungen der größten Momente mit den Richtungen der größten Seegangenergie zusammenfallen. Schmalbandige Richtungsverteilungen im Seegang führen dabei auch zu schmalbandigen Richtungsverteilungen in der Strukturantwort.

### 3 Tragstruktur-Gründung

#### *Verfasser des Kapitels:*

*Richwien, W., Lesny, K. und Hinz, P. (Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen)*

#### 3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Arbeiten in dem Bereich Tragstruktur-Gründung im Rahmen des Forschungsprojekts GIGAWINDplus waren auf die Validierung der während des Forschungsprojekts GIGAWIND entwickelten Bemessungsmethoden ausgerichtet. Dabei kam der Analyse und Bewertung des Langzeitverhaltens der Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen eine besondere Bedeutung zu.

Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen können für die maximal zu erwartende Beanspruchung während eines Extremereignisses nachgewiesen werden. *Wiemann (2007)* untersuchte die Extremlastereignisse am Beispiel der Monopilegründung und die veränderten Randbedingungen hinsichtlich der größeren Pfahlabmessungen im Vergleich zu den bisherigen Erfahrungswerten. Jedoch stellen die Umweltbedingungen, denen Offshore-Windenergieanlagen ausgesetzt sind, besondere Herausforderungen hinsichtlich der Dauerbeanspruchung aus Wind, Wellen und Strömung dar, die ebenfalls im Rahmen der Bemessung berücksichtigt werden müssen. So wird bei einer Bemessung nach den Regeln der Technik (z.B. *DIN 1054* oder *GL „Rules and Regulations“ 2005*) gefordert, negative Langzeiteffekte, wie Verformungsakkumulationen und Tragfähigkeitsminderungen, entweder durch entsprechende Dimensionierung auszuschließen oder in die Berechnung einzubinden. Für die hier betrachteten Gründungen bedeutet dies, dass mit den Auswirkungen der wiederkehrenden Belastung die Verformungen über die Zeit zu ermitteln sind und geprüft werden muss, ob eine Beeinträchtigung der Gründung durch Porenwasserdruckakkumulation oder Verminderung der Tragfähigkeit vorliegt. Das im Rahmen von GIGAWINDplus entwickelte ingenieurpraktische Bemessungskonzept geht genau darauf ein.

Ziel der Bemessung ist es, Abminderungen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu quantifizieren und durch Festlegung der Gründungsabmessungen so zu begrenzen, dass die Abminderungen innerhalb akzeptabler Grenzen bleiben. Die Gründung muss so dimensioniert werden, dass während des Anlagenbetriebs, wie auch während eines Extremereignisses, ausreichend kleine Spannungsänderungen im Boden eintreten werden. Dazu sind in unserem Bemessungskonzept die notwendige Strategie und die erforderlichen Nachweise mit dem Ziel einer Gründungsoptimierung definiert worden. Über den gesamten Projektverlauf hinweg wurde an der konsequenten Umsetzung des Konzepts und dessen praktischer Anwendbarkeit gearbeitet.

#### 3.2 Bemessungskonzept

Das Bemessungskonzept steckt den Rahmen der zu führenden Nachweise für eine umfassende Untersuchung des Gründungsverhaltens ab. Es beinhaltet die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nach *DIN 1054 (2005)* und die zusätzlichen Nachweise zu Überprüfung des Verhaltens unter zyklischer Einwirkung. In Bild 3-1 ist das Ablaufschema des Bemessungskonzepts am Beispiel der Monopilegründung dargestellt.

Das Konzept sieht vor, im ersten Schritt die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit einer Gründung für gewählte Abmessungen und die maßgebende Belastung aus einem Extremereignis, die quasistatisch angesetzt wird, nachzuweisen.

Im zweiten Schritt wird das zyklische Belastungsverhältnis als das Verhältnis der zyklischen Lastamplituden zur statischen Grenztragfähigkeit überprüft. Dazu müssen alle relevanten, über die Lebensdauer auftretenden Lastamplituden möglichst genau entsprechend einer deterministischen Vorgehensweise erfasst werden. Dann wird festgestellt, inwieweit mit einer Zunahme der Verformungen zu rechnen ist. Der kritische Grenzwert für das zyklische Belastungsverhältnis, oberhalb dessen ein Versagen der Gründung durch progressiven Bruch des Bodens eintritt, muss anhand von zyklischen Triaxialversuchen ermittelt werden. Weiterhin ist eine mögliche Generierung von Porenwasserüberdrücken zu analysieren. Kann eine tragfähigkeitsmindernde Akkumulation ausgeschlossen werden, sind die Langzeitverformungen zu ermitteln.

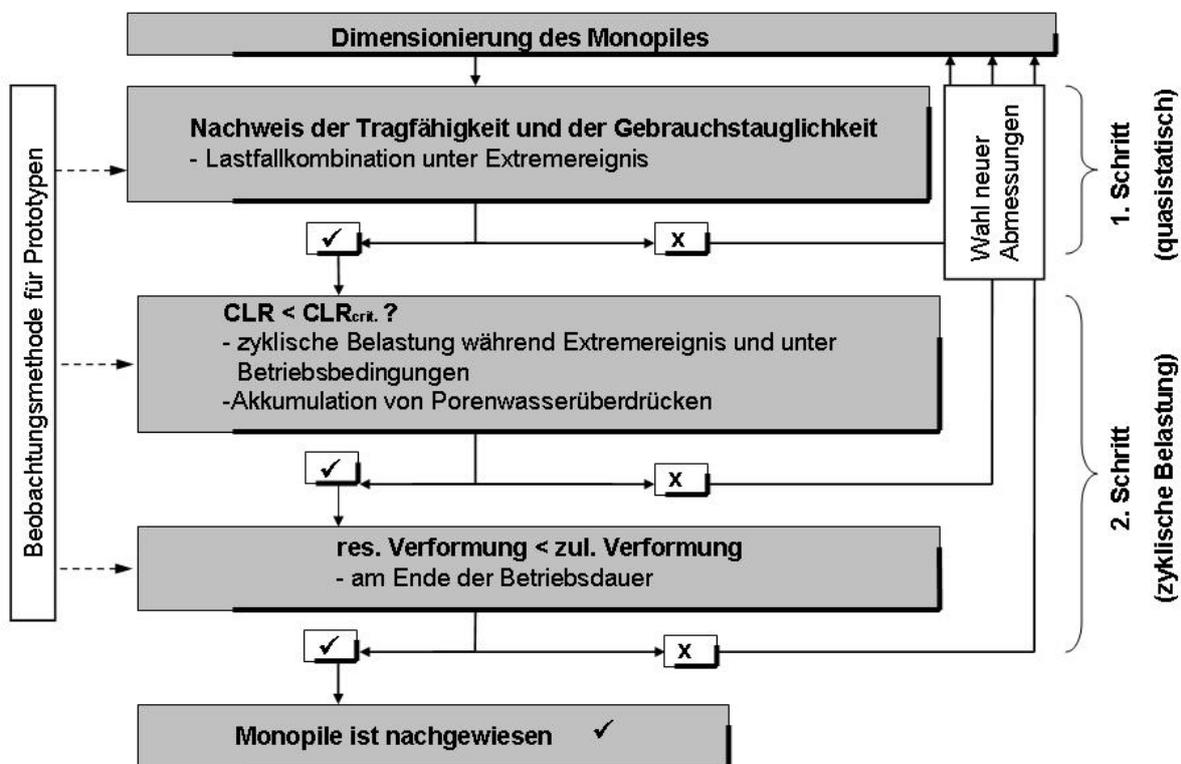


Bild 3-1: Bemessungskonzept am Beispiel der Monopilegründung (Hinz et al. 2007a)

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bezüglich fehlender Vergleichsobjekte ist eine messtechnische Überwachung von ausgesuchten, im besten Falle der zu Beginn eines (Pilot-) Projektes zu bauenden Windkraftanlagen, unerlässlich, bis ein gewisses Maß an Erfahrung gewonnen wurde (Richwien et al., 2005).

Die zur Verfügung stehenden Messdaten des Messmastes Amrumbank konnten nicht dazu beitragen, die Frage nach dem Langzeitverhalten Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen zu klären. Die aufgezeichneten Messdaten zeigten zum einen nur sehr geringe Ausschläge bzw. Verformungen, zum anderen waren die Messerergebnisse aus Beschleunigungsaufnehmern und Dehnungsmessstreifen nicht konsistent, so dass damit keine Langzeitbetrachtung erfolgen konnte. Mit der Zeit ausfallende Sensoren behinderten zudem die kontinuierliche Daten-

auswertung. Als Konsequenz daraus kann bis zum jetzigen Zeitpunkt nur unter Laborbedingungen untersucht werden, wie sich das Verhalten unter Dauerbelastung entwickelt.

### 3.3 Einbeziehung zyklischer Elementversuche - Elementverhalten

Die durchgeführten zyklischen Triaxialversuche an vornehmlich bindigen Böden bestätigen unsere bisherige Annahme über das Bodenverhalten bei zyklischer Belastung. Anhand der Ergebnisse der zyklischen Triaxialversuche können folgende Aussagen getroffen werden:

1. Es existiert eine minimale zyklische Spannungsänderung, ab der plastische Dehnungen akkumulieren. Unterhalb dieser Dauerfestigkeit kann die Akkumulation plastischer Dehnungen vernachlässigt werden.
2. Es existiert eine maximale zyklische Spannungsänderung, bis zu der ein stabilisierendes Verhalten der Bodenprobe auftritt und die Dehnungsraten einem konstanten Wert entgegenstreben. Oberhalb dieses Wertes treten unzulässige Verformungen auf oder die Bodenprobe versagt durch progressiven Bruch.
3. Die Entwicklung der gemessenen plastischen Dehnungen kann für zyklische Spannungsänderungen, deren Größe sich zwischen minimaler und maximaler Spannungsänderung befindet, funktional beschrieben werden.

Für nichtbindige Böden ist die minimale zyklische Spannungsänderung generell sehr klein. Es treten bereits bei kleinsten Spannungsänderungen neben elastischen auch plastische Dehnungen auf, die sich aufsummieren können. Auch zeigen nichtbindige Böden unter zyklischer Belastung keine ausgeprägte Stabilisierung, sondern eher eine stetig wachsende Verformung, wobei die Zunahme gering sein kann.

Es ist generell nicht möglich, das Verhalten einer Bodenprobe unter zyklischer Belastung unter einem bestimmten Ausgangsspannungszustand zu beschreiben, ohne vorher zyklische Elementversuche durchzuführen. (Richwien et al., 2006).

Beispielhaft sind in Bild 3-2 die resultierenden Vertikaldehnungen eines zyklischen Triaxialversuchs dargestellt. Die gezeigte Festigkeitskurve ist direkt vom jeweiligen Spannungsniveau und der zulässigen Dehnung abhängig.

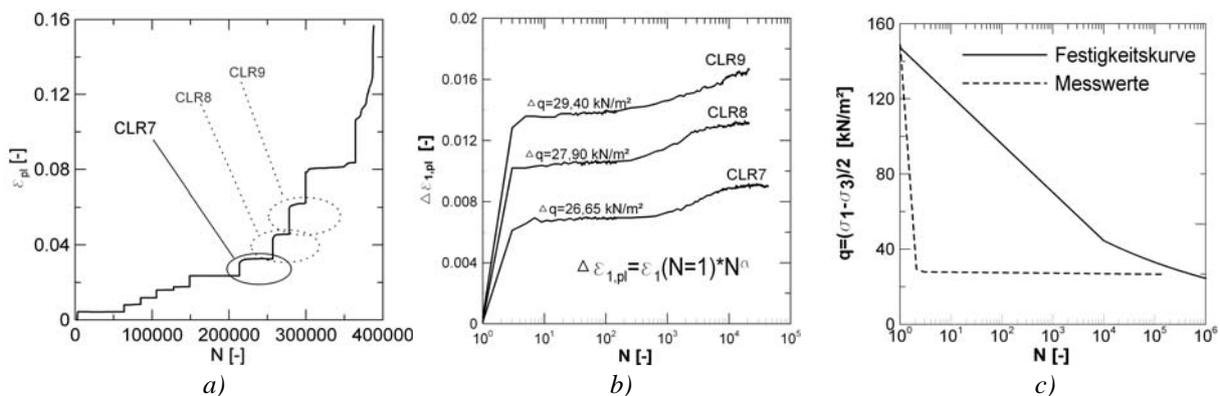


Bild 3-2: Ergebnis eines zyklischen Triaxialversuchs (Hinz et al., 2007a);

- a) Verlauf der absoluten plastischen Dehnung
- b) Änderung der plastischen Dehnung je Laststufe
- c) abgeleiteter Verlauf der Festigkeitskurve

### 3.4 Ermittlung der Verformungsentwicklung – Übertragung des Elementverhaltens auf das Systemverhalten

Für Monopile-Gründungen wurde eine ingenieurpraktische Vorgehensweise vorgeschlagen, mit der eine numerische Analyse des Tragverhaltens unter hoher Zyklenzahl durchgeführt werden kann (Hinz et al. 2007b). Dazu sind explizite Stoffansätze erforderlich, die nicht für jede einzelne Spannungsänderung inkrementell eine zugehörige Dehnungsänderung berechnen, sondern auf zyklenzahlabhängige Stoffparameter zurückgreifen. Die Berechnung entspricht dann grundsätzlich der eines monoton beanspruchten Monopiles, jedoch wird berücksichtigt, dass die Bodeneigenschaften von der Zyklenzahl und dem Charakter der zyklischen Belastung, i. W. die Kombinationen aus Spannungsamplitude, mittlerer Spannung und Spannungszustand, beeinflusst werden. Somit sind zunächst die Belastungsverhältnisse im System zu ermitteln, für die das Elementverhalten im zyklischen Triaxialversuch untersucht und später auf das System der Gründungskonstruktion übertragen wird.

Die Einwirkungen aus Seegang können z.B. mit Hilfe des Wellenverteilungsdiagramms und dem daraus abgeleiteten Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm ermittelt werden. Zu jeder Wellenhöhe lässt sich mit geeigneten Wellentheorien die Belastung auf das Bauwerk angeben. Dann wird für jede Wellenhöhe die Systemantwort unter Ansatz der zugehörigen Belastung als quasi-statische Ersatzbelastung berechnet. Im Nahfeld der Gründungskonstruktion werden so Spannungsänderungen entsprechend Bild 3-3 erzeugt, die direkt von der Wellenhöhe abhängen und deren Häufigkeiten dem Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm entnommen werden können. Mit den nun ermittelten Bodenspannungen lassen sich die Randbedingungen für die zyklischen Triaxialversuche festlegen. Die zyklische Tragfähigkeit des Bodens, welche in der Festigkeitskurve nach Bild 3-2 dokumentiert wird, gilt somit nur für diesen Spannungsbereich.

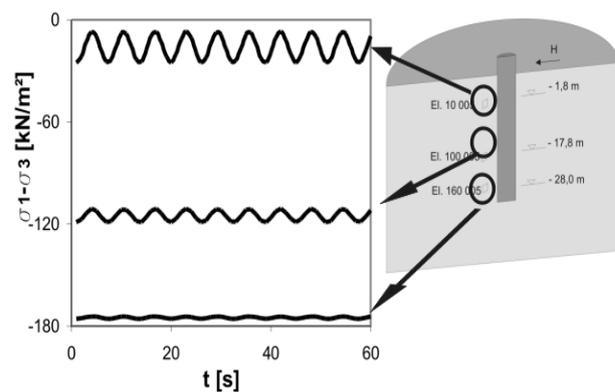


Bild 3-3: Spannungsverhältnisse bei einer Monopilegründung (Richwien et al., 2005)

Für bindige als auch für nichtbindige Böden (z.B. Stewart 1986, Lee & Focht 1976) ist die Annahme einer linearen Verformungsakkumulation in erster Näherung gerechtfertigt. Somit kann für die Bodenprobe mit bekannter zyklischer Festigkeit die akkumulierte plastische Dehnung nach einer bestimmten Zeitdauer unter Anwendung der Miner'schen Regel ermittelt werden. Die gewählte Zeitdauer bestimmt dabei wiederum die Zyklenzahl und die Größe der Spannungsänderungen. Bei sehr großen Zeiträumen ist mit entsprechend höheren Wellen bzw. größeren Spannungsänderungen zu rechnen.

Ist die akkumulierte plastische Dehnung am Element bekannt, kann auch die plastische Verformung am System berechnet werden. Je nach Gründungskonstruktion und entsprechend gewähltem Berechnungsmodell ist dazu die Bodensteifigkeit anzupassen. Für Monopile-Gründungen bedeutet dies eine Steifigkeitsabminderung der bodennahen Schichten bis in eine Tiefe, die dem ein- bis zweifachen Pfahldurchmesser entspricht. Die genaue Tiefe ist durch den Ort festgelegt, unterhalb dessen nur noch Spannungsänderungen auftreten, die kleiner als das kritische zyklische Spannungsverhältnis sind (Hinz et al. 2006, Lesny & Hinz 2006).

Um das Systemverhalten eines Monopiles am Ende der Nutzungsdauer vorherzusagen, wurden verschiedene Berechnungsmodelle geprüft. Neben der bekannten p-y-Methode und der Finite-Elemente-Methode, wurde auch das weniger verbreitete Strain-Wedge-Modell eingesetzt.

Die Anwendbarkeit des Strain-Wedge-Modells für Monopile-Gründungen wurde in einer umfassenden Parameterstudie belegt. Dabei wurde es mit den bekannten Ansätzen der p-y-Methode verglichen und es konnten ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Das Strain-Wedge-Modell hat den Vorteil gegenüber der p-y-Methode, dass ausschließlich im Labor zu ermittelnde Bodenkennwerte Eingang in die Berechnung finden. Die Zuhilfenahme empirischer Systemparameter ist nicht erforderlich. Gegenüber der Finite-Elemente-Methode ist es ein einfacheres Modell, welches aber speziell für horizontal belastete Pfähle entwickelt wurde.

Im Detail wird bei der Finite-Elemente-Analyse eines Monopiles der Elastizitätsmodul des Bodens im oberen Bereich durch einen Ideellen Elastizitätsmodul ersetzt. Er stellt einen zyklenzahlabhängigen Elastizitätsmodul dar, bei dem an die Stelle der elastischen Dehnung die akkumulierte plastische Dehnung tritt. Wird dagegen das Strain-Wedge-Modell verwendet, ist die Referenzdehnung als maßgebende Eingangsgröße auf die akkumulierten plastischen Dehnungen abzustimmen. Die Referenzdehnung ist als Dehnung bei halber Bruchspannung im statischen Triaxialversuch definiert. Der Einfluss der Zyklenzahl wird durch die Annahme berücksichtigt, dass die Referenzdehnung direkt mit der Entwicklung der plastischen Dehnung verknüpft ist und damit die gleichen Zuwachsraten hat (*Richwien et al. 2006*). Die resultierenden Verformungen zu verschiedenen Zeitpunkten aus beiden Verfahren spiegeln trotz unterschiedlicher Modellvorstellungen das Langzeitverhalten der Gründung relativ eindeutig wider.

Exemplarische Berechnungen zeigen in Bild 3-4 für Monopiles, die zuvor für das Extremereignis bemessen wurden, Verschiebungszunahmen durch zyklische Belastung in Größenordnungen von ca. 10 – 20% gegenüber der Pfahlkopfverschiebung ohne die Berücksichtigung akkumulierter plastischer Verformungen. (*Hinz et al. 2007b, Lesny & Hinz 2007*). Bei konservativem Vorgehen mit entsprechend großzügig gewählten Abmessungen und hochfesten sowie steifen Baumaterialien kann bei den untersuchten Randbedingungen gar keine praxisrelevante Zunahme der Verformungen nachgewiesen werden.

Die Berücksichtigung der Akkumulation plastischer Verformungen ist also vorwiegend für die Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit während der Betriebsdauer von Bedeutung. Ein Versagen des Bauwerks durch Verlust der Tragfähigkeit ist bereits nach der Dimensionierung für das Extremereignis mit einer bestimmten, aber nicht genau bekannten Sicherheit ausgeschlossen.

Für die Monopilegründung ist damit ein zyklisches Versagen durch Verlust der Tragfähigkeit sehr unwahrscheinlich. Werden entsprechend dem Bemessungskonzept die Eigenschaften des Bodens unter zyklischer Belastung geprüft und die nötigen Spannungsbereiche für einen progressiven Bruch ausgeschlossen, kann das oft unterstellte Szenario der nach einem Sturm

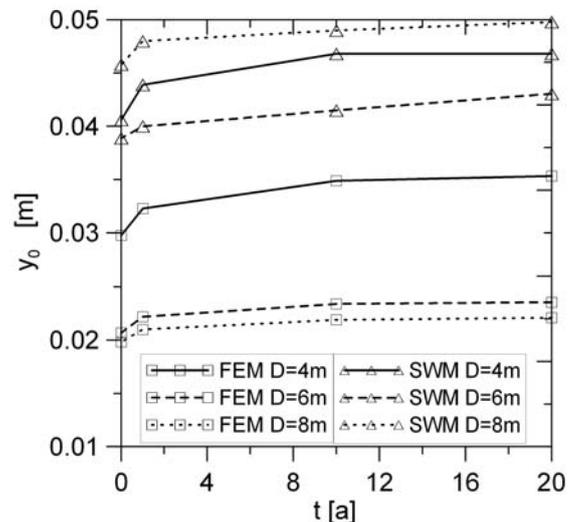


Bild 3-4: Pfahlkopfverschiebungen über die Lebensdauer (*Hinz et al. 2007a*)

schiefstehenden oder gar umgekippten Offshore-Windenergieanlagen praktisch kaum eintreten. Ein Versagen der Struktur ist dann genauso selten zu erwarten wie bei anderen Ingenieurbauwerken, die den Regeln der Technik entsprechend und den aktuellen Wissensstand berücksichtigend, bemessen wurden.

Unsere Forschung konzentriert sich daher zukünftig auf den Bereich zwischen Einsetzen der Akkumulation plastischer Verformungen und sich gerade noch stabilisierenden plastischen Verformungen von Monopile-Gründungen. Zu diesem Zweck sind dringend Erfahrungen mit vergleichbaren Bauwerken notwendig, um die Ergebnisse aus insgesamt rd. 7 Jahren Forschungsarbeit anwenden und in der Praxis prüfen zu können. Werden dann die Langzeitverformungen der Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen zutreffend prognostiziert, kann dies einen Beitrag zur technischen Optimierung und damit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen leisten.

## 4 Validierte Strukturmodelle und Systemidentifikation

### Verfasser des Kapitels:

Haake, G., Gerasch, W.-J. und Rolfes, R. (Institut für Statik und Dynamik, Leibniz Universität Hannover)

### 4.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Zielsetzung war die Bereitstellung validierter Rechenmodelle von gesamten Tragstrukturen, mit denen in Verbindung mit Ergebnissen der anderen Kapitel eine wirtschaftlichere Bemessung erreicht wird. Üblicherweise werden Gesamtstrukturmodelle verwendet, die auf Grundlage von Konstruktionszeichnungen erstellt worden sind. Diese Modelle weisen meist erhebliche Abweichungen zur realen Struktur auf. In GIGAWINDplus sind Verfahren entwickelt worden, mit denen vorhandene Strukturmodelle durch Validierung an die Realität angepasst werden können. Als Kriterium für die Güte eines Modells bietet sich das Eigenschwingungsverhalten an, da in den modalen Größen die Eigenschaften des gesamten Systems enthalten sind. Die Belastung von Offshore-Windenergieanlagen (natürliche Erregung, Betriebslasten) wird messtechnisch nicht erfasst. Für die Systemidentifikation (Ermittlung der modalen Größen) stehen demnach nur die gemessenen Antworten der Struktur zur Verfügung. Herkömmliche Methoden wie die Fouriertransformation (FFT oder DFT) sind nur bedingt geeignet, um Eigenmoden aus diesen Daten zu extrahieren. In GIGAWINDplus wird das Eigenschwingungsverhalten, das als Zielvorgabe für die Modellvalidierung dient, über autoregressive Modelle ermittelt. Bild 4-1 veranschaulicht, wie mit Hilfe der identifizierten modalen Größen das Rechenmodell des Gesamtsystems iterativ validiert wird.

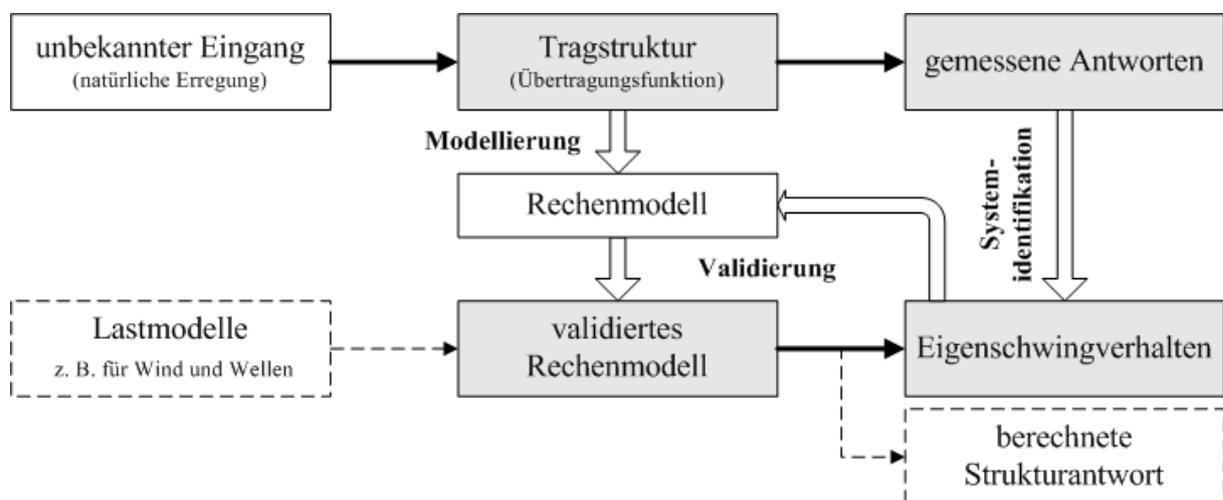


Bild 4-1: Übertragung des dynamischen Verhaltens einer Struktur auf die Simulationsebene

## 4.2 Zeitreihenanalyse und Systemidentifikation

### 4.2.1 Spektralanalyse „FINO 1“ und „Amrumbank“

Bild 4-2a zeigt Frequenzspektren der Beschleunigungszeitverläufe von FINO 1. Zur besseren Übersicht sind nach Höhenordinaten gemittelte Spektren dargestellt. In Bild 4-2b sind in gleicher Weise die Spektren der Dehnungen dargestellt. Um Eigenmoden des Systems zu identifizieren, sind in den Jahresberichten 2004 und 2005 Erregerspektren und Ergebnisse der Modalanalyse am numerischen Strukturmodell hinzugezogen worden. So zeigt sich, dass die großen

Amplituden in den Dehnungsspektren zwischen 0,1 Hz und 0,5 Hz fast deckungsgleich sind mit Wellenspektren und demnach nicht auf Eigenschwingungen des Systems zurückzuführen ist. Eine detaillierte modale Identifikation der Peaks auf Grundlage von numerischen Untersuchungen (vgl. *Jahresbericht 2005*, Abschnitt 4.4.4) findet sich in Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Modale Identifikation „FINO 1“

	Peak im FFT-Spektrum in Hz	angeregte Bauteile / identifizierte Eigenform	
1.	0,583	1. EF Gesamtsystem (1. EF Windmessmast)	
2.	1,278	2. EF Gesamtsystem (Plattformdeck)	
3.	1,377		Torsion um WMM
4.	1,634		Biegung N–S
5.	2,236	3. EF Gesamtsystem (2. EF Windmessmast)	
6.	2,514	4. EF Gesamtsystem (Biegung Fußpunkte)	
7.	3,074	5. EF Gesamtsystem (Helideck)	
8.	3,150	6. EF Gesamtsystem (Torsion Fußpunkte)	

Für die Spektralanalyse am Messmast „Amrumbank West“ wird mit dem 04.06.2005 13:30h ein Zeitpunkt im Anfangszustand mit starker Windanregung gewählt. Bild 4-2c zeigt die Frequenzspektren der Beschleunigungssensoren in Nord-West-Richtung. Für die gleiche Richtung sind in Bild 4-2d die Dehnungssignale ausgewertet. Auf Basis vorliegender Erregerspektren und Vergleichsrechnungen am numerischen Modell wird der energiereiche Frequenzbereich zwischen 0,1 Hz und 0,5 Hz der Wellenanregung zugeschrieben.

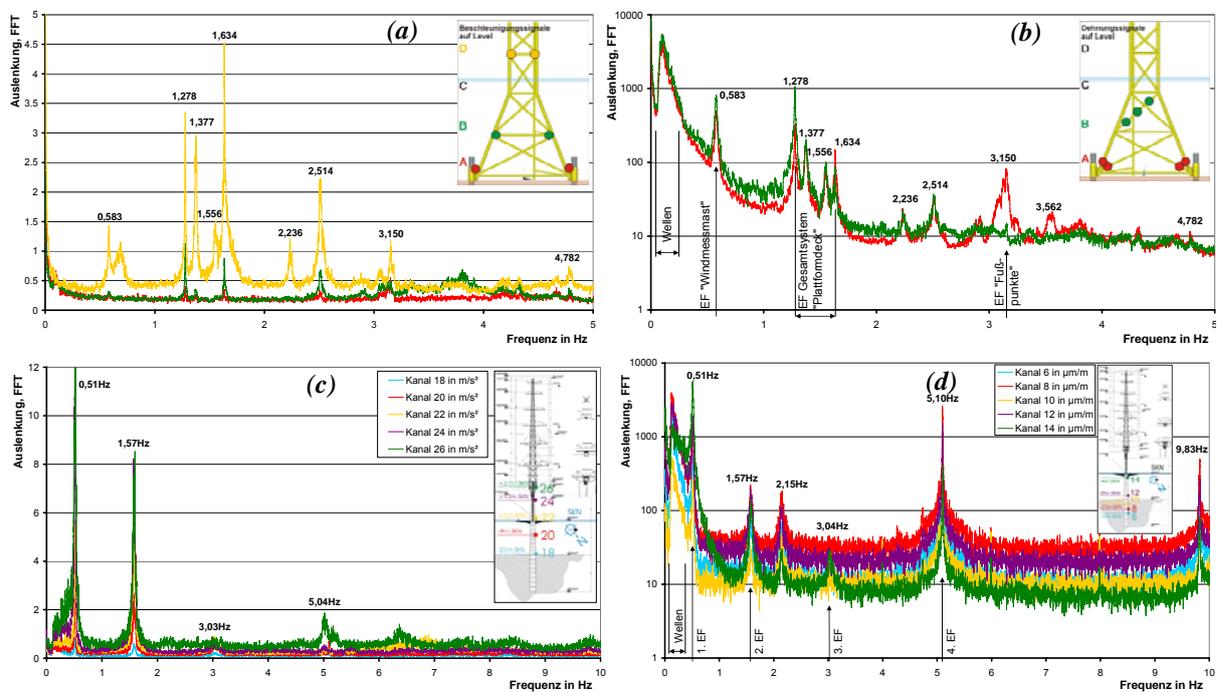


Bild 4-2: Frequenzspektren der Beschleunigungs- und Dehnungssensoren auf unterschiedlichen Höhen für „FINO 1“ (a, b) und „Amrumbank West“ (c, d).

Die Eigenfrequenzen weisen, typisch für einen Kragarm, bei höheren Frequenzen einen größer werdenden Abstand auf. Die vierte Eigenform, die in diesem Dehnungsspektrum besonders gut erkennbar ist, wird nur bei böigen Windverhältnissen kurzzeitig angeregt und ist bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten kaum auszumachen.

#### 4.2.2 Autoregressive Modelle in der Systemidentifikation

Unter einem *Autoregressiven Modell* (AR-Modell) versteht man ein mathematisches Verfahren, mit dem Zeitreihen all jener Systeme beschrieben werden können, die deterministische Anteile besitzen. Der Grundgedanke besteht darin, jeden Wert  $y_k$  derart durch gewichtete Vorgängerwerte auszudrücken, dass diese über die gesamte Zeitreihe  $\{y_k\}$  konstant bleiben. Dabei enthalten die Wichtungsfaktoren  $\phi_j$  Informationen zu den Eigenschaften des Systems, die für den jeweiligen Anwendungsfall bestimmt werden müssen. Im Jahresbericht 2006, Abschnitt 4.3, ist dargestellt, wie mit AR-Modellen

$$\mathbf{y}_k = \sum_{j=1}^N \phi_j \cdot \mathbf{y}_{k-j} + \mathbf{a}_k \quad (1)$$

aus gemessenen Zeitreihen mechanischer Systemen Eigenwerte, modale Dämpfungen und Eigenvektoren bestimmt werden. Mit diesen Informationen wird das System identifiziert. Gegenüber anderen Zeitreihenanalyseverfahren, insbesondere verglichen mit FFT/DFT bieten die AR-Modelle bezüglich Genauigkeit, Automatisierbarkeit und den messtechnischen Anforderungen entscheidende Vorteile, die in den Jahresberichten 2005, Abschnitt 4.2.1, und 2006, Abschnitt 4.3, näher erläutert werden:

- Der Systemidentifikation stehen neben den Eigenfrequenzen auch modale Dämpfungen und Eigenvektoren zur Verfügung,
- die Eigenfrequenzen werden bei AR-Modellen analytisch berechnet während sie bei der Spektralanalyse graphisch abgelesen werden müssen und
- das analysierte Zeitsignal kann deutlich kürzer gewählt werden, so dass auch kurzzeitige Belastungssituationen selektiert werden können.

#### 4.2.3 Systemidentifikation am Messmast „Amrumbank West“

Am Messmast Amrumbank ergibt die Systemidentifikation mit dem AR(20)-Modell die in Tabelle 4-2 zusammengestellten Ergebnisse (vgl. *Jahresbericht 2006*, Abschnitt 4.3.4). Die Identifikation der realen Moden gelingt für die ersten drei Eigenmoden des Systems und zeigt hinsichtlich der Eigenfrequenzen eine sehr gute Übereinstimmung mit der FFT.

Tabelle 4-2: Systemidentifikation „Amrumbank West“

	AR(20)-Modell		Vergleich FFT
	Eigenfrequenz in Hz	modale Dämpfung in %	Eigenfrequenz in Hz
1. Eigenmode	0,498	3,60	0,51
2. Eigenmode	1,575	2,24	1,57
3. Eigenmode	3,041	6,16	3,03

Vergleicht man die Eigenformen des AR(20)-Modells mit denen aus der FE-Berechnung (Bild 4-3), so wird am Beispiel der zweiten Eigenform deutlich, dass die Anordnung der Messstellen der Beschleunigungsaufnehmer nur für einen bestimmten Bereich eine zuverlässige Überprüfung der identifizierten Eigenformen erlaubt.

Messungen an einem Monopile Maßstabsmodell zeigen, dass AR-Modelle bei Verwendung zusätzlicher Sensoren eine noch klarere Systemidentifikation zulassen.

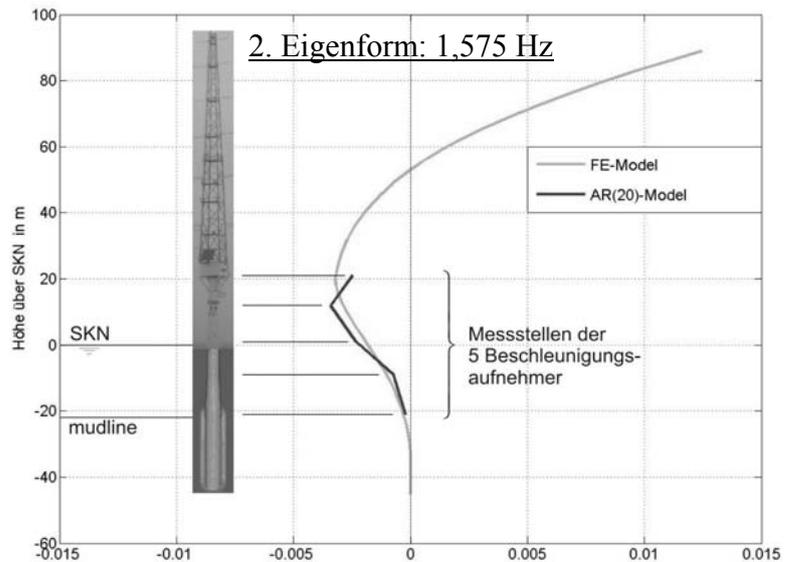


Bild 4-3: „Amrumbank West“, 2. Eigenform: FE-Modell vs. AR(20)-Modell

### 4.3 Validierung der numerischen Strukturmodelle

Im Rahmen der Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen werden auch Algorithmen zur systematischen Validierung von Rechenmodellen einer Gesamttragstruktur behandelt (vgl. *Jahresbericht 2006*, Abschnitt 4.4). Während in anderen Projektteilen Lastmodelle für die realitätsnahe Simulation des Eingangs erarbeitet werden, behandelt dieser Teil die Übertragungsfunktion, die zur Berechnung der Strukturantwort aus gegebenem Eingang dient. Als Indikator für die Qualität des validierten Strukturmodells wird das Eigenschwingverhalten verwendet, das alle globalen Eigenschaften einer leichten Struktur widerspiegelt.

Im Gegensatz zu manuellen Modellkorrekturen verwendet das in GIGAWINDplus entwickelte Verfahren zur Modellvalidierung mathematische Optimierungsalgorithmen (z. B. Newton-Iteration, Sekantenverfahren, Newton-Raphson), die in einem iterativen Prozess Übereinstimmungen des Eigenschwingverhaltens zwischen dem Rechenmodell und der realer Struktur herbeiführen.

Bei der Newton-Iteration wird zunächst eine funktionale Abhängigkeit der Eigenfrequenzen  $\omega$  von den freien Parametern  $\mathbf{x}$  nach Gleichung 2 als Nullstellenproblem formuliert, indem der Zielvektor  $\omega_0$  subtrahiert wird. Wenn die Funktionswerte des Ausgangszustandes mittels Modalanalyse im FE-Programm berechnet sowie die (partiellen) Ableitungen in der Jacobi-Matrix  $f'(\mathbf{x})$  zusammengestellt sind, so kann nach Newton der nächste Parametersatz ermittelt werden sofern die Jacobi-Matrix nicht singulär ist (vgl. *Jahresbericht 2006*, Absatz 4.4.1):

$$f(\mathbf{x}) = \omega(\mathbf{x}) - \omega_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \left(f'(\mathbf{x}^{(k)})\right)^{-1} \cdot f(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (3)$$

mit  $\mathbf{x}^{(k)}$  : aktueller Parametersatz

Für die numerische Modalanalyse greift das in MATLAB implementierte Verfahren vollautomatisch auf ein FE-Programm zu. Voraussetzung ist ein (über wenige Modellfaktoren) parametrisiertes FE-Modell, dessen Eigenfrequenzen den gemessenen Größen eindeutig zugeordnet sind. Zur Wahl der Parameter ist es sinnvoll, im Vorfeld deren Einfluß auf das Eigenschwingverhalten mittels Sensitivitätsanalysen zu verifizieren.

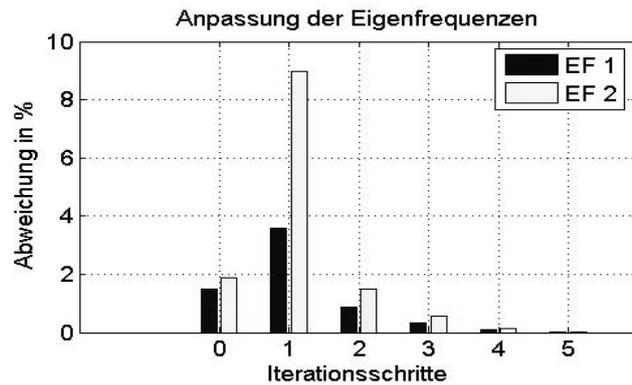


Bild 4-4: Iterationsverlauf der Validierung, Rechenmodell „Amrumbank West“

#### 4.3.1 Sensitivitätsanalysen an Referenzobjekten

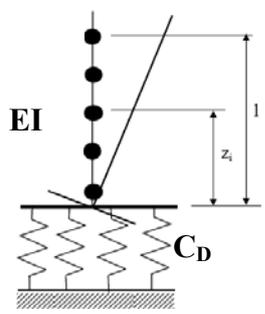
Am Beispiel der Modelle „Amrumbank West“ und „FINO 1“ sind Sensitivitätsanalysen in den Jahresberichten 2005, Abschnitt 4.4, und 2006, Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4, dokumentiert. Nachfolgend werden allgemeingültige Erkenntnisse für Monopile- und für aufgelöste Konstruktionen zusammengefasst:

- *Horizontale Federsteifigkeit:* Bei der Jacket-Konstruktion ergeben sich signifikante Änderungen im Eigenschwingverhalten erst bei Frequenzen über 2 Hz oder ab einer Reduzierung der Steifigkeit auf unter 10%. Bei den Monopilen zeigen sich in der 2. Eigenform Abweichungen von  $\pm 7,5\%$  der Eigenfrequenz infolge einer Steifigkeitsänderung auf 10%. Der Einfluss ist daher sehr gering.
- *Vertikale Federsteifigkeit:* Hier erweisen sich Steifigkeitsverminderungen besonders auf die niedrigeren Eigenformen als effektiv, allerdings erst bei Abminderungen auf 10% der errechneten Federsteifigkeit. Für den Monopile bleibt auch eine solch drastische Änderung der Steifigkeit mit  $\pm 1,5\%$  Abweichung der Frequenz nahezu bedeutungslos. Vorangegangene Untersuchungen zeigen aber, dass ein kompletter Verzicht auf die Modellierung der Rammpfähle, z. B. in Form einer starren Lagerung, nicht vertretbar ist.
- *Mitschwingende Wassermassen:* Analytisch wird für bestimmte Voraussetzungen ein Maximalwert der 2-fachen im Rohr befindlichen Wassermasse ermittelt ( $C_m = 2$ ). Da die zusätzliche Masse im unteren Bereich des Modells aufgebracht wird, reagiert es bei beiden Konstruktionsformen erst etwa ab der 3. Biegeeigenform. Hier ist der Einfluss dann jedoch nicht mehr vernachlässigbar. Als realistisch haben sich Werte zwischen  $C_m = 1$  und  $C_m = 2$  erwiesen.
- *Steifigkeit Gittermast:* Als einziger Steifigkeitsparameter mit maßgebendem Einfluss auf die Grundfrequenz hat sich die Steifigkeit der Gittermaste herausgestellt. Die Gittermaste sind stark vereinfacht als Einzelstab mit Massenelementen im Rechenmodell abgebildet und eignet sich aufgrund zahlreicher Anschlussdetails zur Validierung.
- *Nachgiebigkeit der Jacketknoten:* Da das Jacket mit Balkenelementen modelliert ist, können die Knotenanschlüsse nur vereinfacht abgebildet werden. Die punktuelle Variation der Steifigkeit an den Knoten zeigt nach oben fast keine Auswirkung auf die (globalen) Biegeeigenformen, erst eine Verringerung der Steifigkeit auf unter 50% zeigt einen signifikanten Einfluss. Auf die lokalen Eigenformen einzelner Streben des Jacket wirkt sich eine Variation der Knotennachgiebigkeit deutlich stärker aus.

- *Massen von Plattformen/Messcontainer:* Sowohl bei „FINO 1“ als auch bei „Amrumbank West“ befinden sich oberhalb der Wasserwechselzone Plattformen mit verschiedenen Containern mit Messinstrumenten etc. Diese Massen können mangels konkreter Angaben nur geschätzt werden. Die größte Sensitivität haben diese Massenparameter auf die 2. Biegeeigenform.

Es zeigt sich für beide Modelle, dass die elastische Einspannung das Eigenschwingverhalten nicht stark genug beeinflusst, um nachvollziehbare Validierungen zu gewährleisten. Stattdessen eignen sich für das Modell „Amrumbank West“ die mitschwingende Wassermasse sowie Steifigkeit und Masse im Bereich Gittermast/Messcontainer als Validierungsparameter. Für die Validierung am Modell „FINO 1“ eignen sich neben der Steifigkeit des Windmessmastes die Massen für Plattformdeck und Helideck.

Zum Einfluss der Lagerungsart auf das Eigenschwingverhalten sei angemerkt, dass dieser bei weichen Strukturen recht gering ist, wie folgende Gleichung (Gerasch, 2005) unter Vernachlässigung der Schubdeformation für  $f_0$  zeigt:



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{\left(\frac{l}{3EI} + \frac{1}{l \cdot G \cdot A_s} + \frac{1}{C_D \cdot I_F}\right) \cdot \sum_i G_i \cdot z_i^2}} \quad (4)$$

↓ dominant für kleine EI
 ↓ Federsteifigkeit für Kippschwingungen

#### 4.3.2 Validiertes Rechenmodell „FINO 1“

Tabelle 4-3: Modellvalidierung „FINO 1“

Parameter:	Messung FFT	Ausgangs- FE-Modell		Validiertes FE-Modell	
1. Parameter: Steifigkeit Gittermast		1,00		0,69187	
2. Parameter: Masse Plattformdeck		1,00		0,3048	
3. Parameter: Masse Helideck		1,00		1,3824	
Eigenfrequenzen:	in Hz	in Hz	Fehler	in Hz	Fehler
1. Eigenform Gesamtsystem	<u>0,58</u>	0,652	12,07%	0,580	0,00%
		0,671	15,69%	0,592	2,07%
2. Eigenform Gesamtsystem	<u>1,278</u> <u>1,377</u> <u>1,634</u>	1,273	0,39%	1,278	0,00%
		1,360	1,23%	1,350	1,96%
		1,605	1,77%	1,634	0,00%
3. Eigenform Gesamtsystem	2,23	2,392	7,26%	2,295	2,91%
4. Eigenform Gesamtsystem	2,51 (?)	2,659	5,94%	2,644	5,33%

Als Ausgangsmodell liegt das im Jahresbericht 2005, Abschnitt 4.4, beschriebene Modell zugrunde. Die Validierung wird mit der Newton-Iteration durchgeführt und wird im Jahresbericht 2006, Abschnitt 4.4.4.2 detailliert erläutert. Insbesondere sind die Änderungen der Parameter und Eigenfrequenzen auf Plausibilität geprüft. Insgesamt verringert sich der Fehler im Eigenschwingverhalten des Modells durch die Validierung um 75%. Die validierten Parameter und deren Auswirkung auf die Eigenfrequenzen des Systems sind in Tabelle 4-3 aufgeführt. Die vorgegebenen Zielfrequenzen aus der Messung sind unterstrichen.

### 4.3.3 Validiertes Rechenmodell „Amrumbank West“

Als Ausgangsmodell liegt das im Jahresbericht 2005, Abschnitt 4.5, beschriebene Modell zugrunde. Es wird wiederum das Newton-Verfahren zur Validierung verwendet, wobei drei Zielgrößen vorgegeben und drei Parameter angepasst werden (3x3-Problem). Nach nur zwei Iterationsschritten (Fehlernorm < 0,001) liegt das validierte Modell vor, das in Tabelle 4-4 aufgeführt ist. Die Plausibilitätskontrollen können dem Jahresbericht 2006, Abschnitt 4.4.3.2, entnommen werden.

Tabelle 4-4: Modellvalidierung „Amrumbank West“

<b>Parameter:</b>	<b>Messung AR-Modell</b>	<b>Ausgangs- FE-Modell</b>		<b>Validiertes FE-Modell</b>	
1. Parameter: Masse Messcontainer		1,00		0,4450	
2. Parameter: Steifigkeit Gittermast		1,00		1,0079	
3. Parameter: Mitschwingende Wassermasse ( $C_m$ )		1,00		1,4580	
<b>Eigenfrequenzen:</b>	in Hz	in Hz	Fehler	in Hz	Fehler
1. Eigenform	<u>0,498</u>	0,489	1,89%	0,498	0,00%
2. Eigenform	<u>1,575</u>	1,522	3,37%	1,575	0,01%
3. Eigenform	<u>3,041</u>	3,143	3,36%	3,041	0,01%
4. Eigenform	5,10 (?)	5,135	0,69%	5,253	2,98%

## 5 Tragstruktur – Lebensdaueranalysen und Prognoseverfahren

*Verfasser des Kapitels:*

*Schaumann, P. und Böker, C. (Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover)*

### 5.1 Ausgangslage und Zielsetzung

In Fortführung der Arbeiten aus dem Vorgängerprojekt GIGAWIND lag der Fokus des Projektes GIGAWINDplus im Teilprojekt „Tragstruktur – Lebensdaueranalysen und Prognoseverfahren“ auf der Validierung der zuvor entwickelten Methoden für die Lebensdaueranalyse von Offshore-Tragstrukturen anhand der Messdaten insbesondere der Forschungsplattform FINO1.

In GIGAWIND wurden Methoden für die Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchungen seegangsbeanspruchter Tragstrukturen entwickelt. Besonders hervorzuheben ist hier die Untersuchung unterschiedlicher Konzepte (deterministisch, Zeitbereich, Frequenzbereich), die in dem Softwarepaket *HanOff* zusammengefasst und implementiert wurden. Die Messdaten der FINO1-Plattform boten die Möglichkeit, die Bemessungsmethoden anhand von Naturmessungen zu überprüfen und zu bewerten.

Davon ausgehend wurden in diesem Projekt folgende Punkte einer eingehenden Untersuchung unterworfen:

- Entwicklung einer Datenbank für die Messdaten, die eine effektive Abfrage und Auswertung der FINO-Messdaten sowie ein rasches Auffinden von für Vergleichsrechnungen relevanten Zeiträumen erlaubt
- Weiterentwicklung des Strukturmodells zur besseren Abbildung der dynamischen Eigenschaften der Tragstrukturen sowie Steigerung der Rechenzeiteffizienz
- Vergleich der Messdaten mit Simulationen
- Einfluss Richtungsverteilung der Wellen in Kurzzeitseegangszuständen auf die Ermüdungsbeanspruchungen
- Einfluss der Berücksichtigung lokaler Knotennachgiebigkeiten auf die Ermüdungsbeanspruchungen

### 5.2 FINO-Messdaten

Da an der Plattform FINO1 die Strukturmessdaten mit einer Frequenz von 10 Hz aufgezeichnet wurden, entstehen in relativ kurzer Zeit sehr große Datenmengen, die ohne ein leistungsfähiges Datenmanagement nicht oder nur sehr schwer handhabbar sind. Aus diesem Grund wurde die SQL-Datenbank FINODB entwickelt, in der die Messdaten der FINO-Plattform abgelegt sind und effektiv abgefragt werden können. In der Datenbank werden sowohl die Rohdaten der Strukturmessungen, die in Form von Dehnungen in der Einheit  $\mu\text{m}/\text{m}$  vorliegen, als auch die gemittelten Werte der Wind- und Seegangsmessungen erfasst. Erst die Nutzung einer solchen Datenbank-Architektur macht es möglich, umfassende vergleichende Parameterstudien mit Hilfe der Messdaten vorzunehmen.

Zur Abfrage der Datenbank sowie zur Verarbeitung und Aufbereitung der darin enthaltenen Daten ist ein Programm entwickelt worden, welches aus den Rohdaten direkt Spannungen und Schnittgrößen liefert. Die Funktionsweise der Datenbank sowie der Abfrage ist schematisch in Bild 5-1 dargestellt.

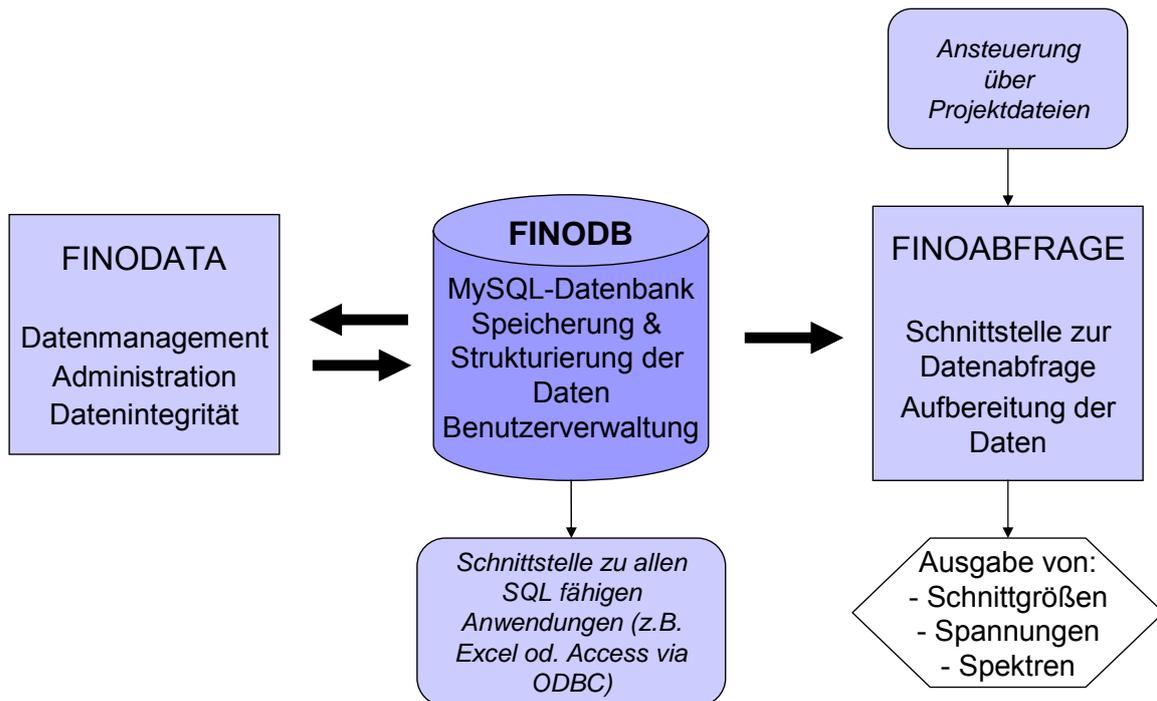


Bild 5-1: Zusammenspiel der Messwertdatenbank FINODB mit Administrationsprogramm FINODATA und Datenaufbereitungsprogramm FINOABFRAGE

### 5.3 Strukturmodellierung

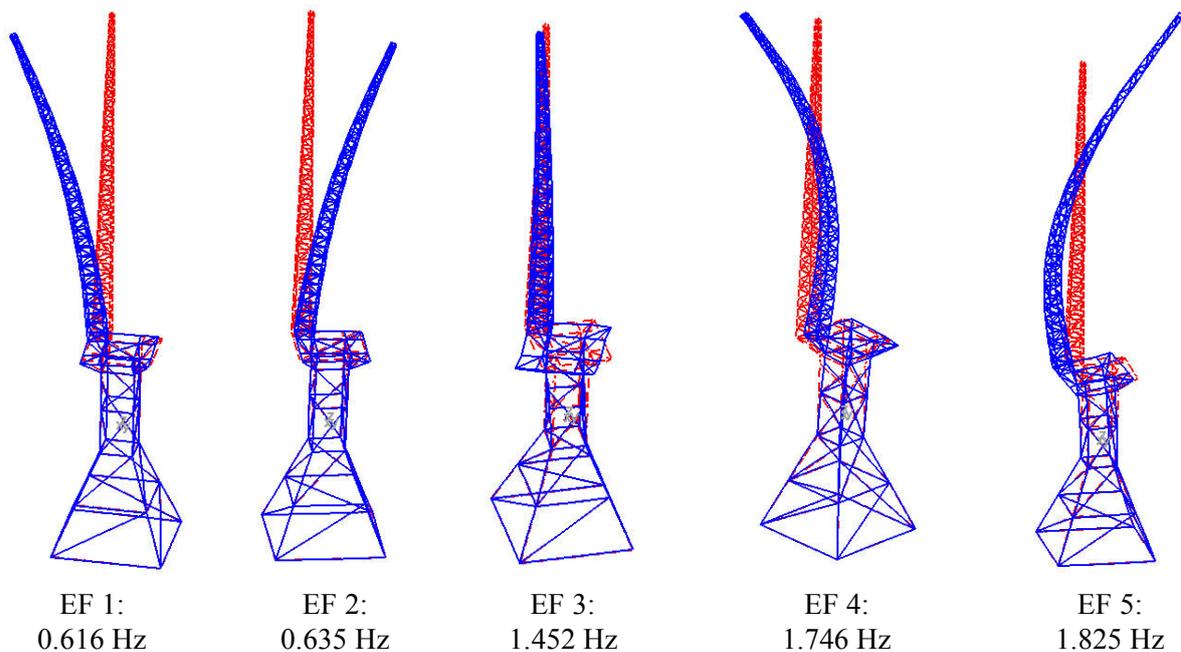
Zeitreihensimulationen sind wegen des instationären Anlagenverhaltens die Standard-Methode zur Lastsimulation von WEA. Aufgrund des großen Rechenzeitbedarfs dieser Simulationen ist darauf zu achten, ein Modell mit möglichst wenigen Freiheitsgraden zu erstellen. Daher wurde zunächst ein vereinfachtes Modell verwendet, bei dem lediglich die Jacket-Tragstruktur der FINO-Plattform detailliert modelliert wurde und die Plattform sowie der eigentliche Messmast durch Einzelmassen vereinfacht berücksichtigt wurden. Es zeigte sich, dass der Anteil der dynamischen Strukturantwort bei der FINO-Plattform relativ gering ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Frequenzbereich der typischen Wellenanregung (ca. 0,1 – 0,4 Hz) recht weit von den Eigenfrequenzen der Tragstruktur entfernt liegt (etwa 1,38 Hz). Daher wurde angenommen, dass eine statische Berechnung der Plattform ausreicht, um Aussagen über das Ermüdungsverhalten zu treffen. Dies wurde durch Vergleichsrechnungen bestätigt, die eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation zeigten (vgl. *GIGAWINDplus Jahresbericht 2004*).

Bei Systemen, bei denen die Dynamik eine größere Rolle spielt, wie es auch für die generell weicheren Tragstrukturen für WEA zu erwarten ist, kann eine solche Vereinfachung unter Umständen nicht zulässig sein. Daher ist das Strukturmodell dahingehend erweitert worden, dass nun der Messmast und in vereinfachter Form die Plattform detaillierter modelliert wurden. Da eine Berechnung dieses recht komplexen Systems im Zeitbereich mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS zu inakzeptabel langen Rechenzeiten geführt hätte, wurde ein eigenes FE-Modell implementiert.

Für die Modellierung wurden elastische Balkenelemente für räumliche Berechnungen verwendet. Diese Elemente besitzen zwei Knoten mit jeweils 6 Freiheitsgraden (drei translatorische, drei rotatorische). Die Formulierung der Elementsteifigkeiten findet sich z.B. in *Meißner (1989)*. Bei dem verwendeten Elementansatz werden lokale Schubdeformationen sowie

geometrische Nichtlinearitäten nicht berücksichtigt. Das Modell ermittelt Beanspruchungen auf der Grundlage der Elastizitätstheorie. Um Berechnungen im Zeitbereich zu ermöglichen, wurde das Newmark-Verfahren mit Rayleigh-Dämpfung implementiert. Außerdem wurde ein auf der Vektoriteration beruhender Algorithmus zur Ermittlung von Eigenwerten und –formen realisiert. Zu Einzelheiten diese Standardverfahren betreffend wird hier auf *Bathe (1990)* und *Schwarz (1984)* verwiesen.

In Bild 5-2 ist das verwendete Strukturmodell der FINO-Plattform mit den ersten 5 Eigenformen dargestellt, wie sie sich aus einer Modalanalyse ergeben.



*Bild 5-2: Weiterentwickeltes Strukturmodell der FINO1-Plattform: erste fünf Eigenformen*

Mit diesem weiterentwickelten Strukturmodell konnte die für Zeitreihensimulation benötigte Rechenzeit um den Faktor 15 verkürzt werden. Gleichzeitig konnte anhand des Vergleichs der Messdaten mit Simulationsergebnissen gezeigt werden, dass die dynamischen Eigenschaften der Tragstruktur genauer abgebildet werden konnten.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen bezog sich auf den Einfluss lokaler Effekte, genauer der lokalen Knotennachgiebigkeit, sowohl auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur als auch auf die Ermüdungsbeanspruchungen der Knotenverbindungen. Die lokalen Knotennachgiebigkeiten wurden mit parametrischen Formeln nach Buitrago sowie durch Anwendung der Substrukturtechnik erfasst und in das oben genannte Strukturmodell der FINO1-Plattform implementiert. In Bild 5-3 ist schematisch das Vorgehen zur Modellierung der Superelemente bei der Berechnung mit Substrukturtechnik dargestellt.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die Berücksichtigung der lokalen Knotennachgiebigkeiten durch die damit verbundene Schnittgrößenumlagerung innerhalb des Systems zu einer signifikanten Steigerung der Lebensdauer ausgewählter Knoten geführt hat. Der Einfluss auf das dynamische Tragverhalten fällt im Frequenzbereich der Wellenanregung bei der FINO1-Plattform gering aus, konnte aber in höheren Moden durch Vergleichsrechnungen nachgewiesen werden.

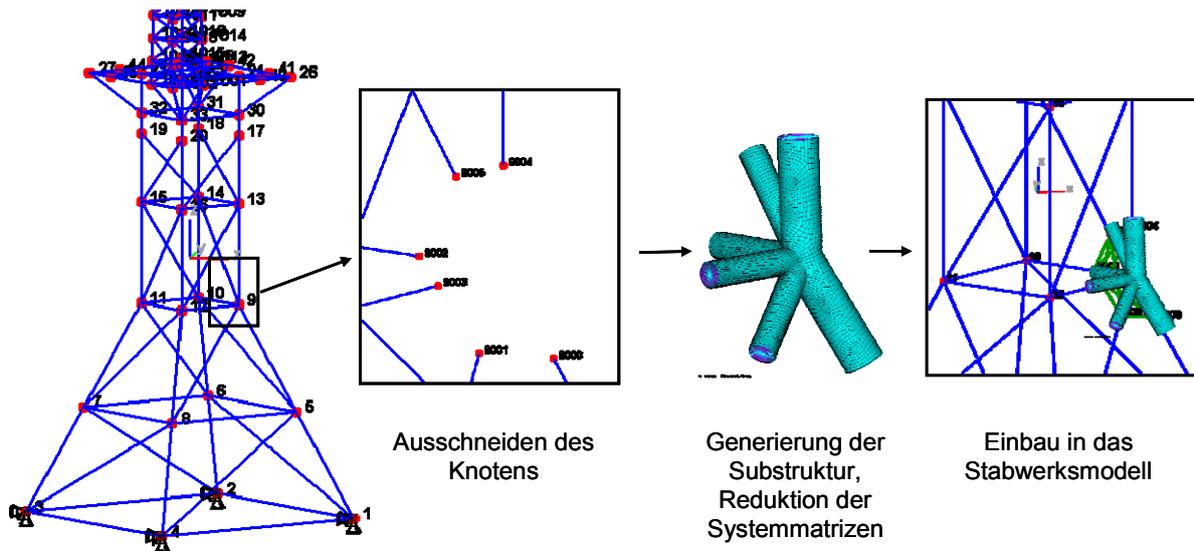


Bild 5-3: Darstellung der implementierten Vorgehensweise für die Generierung von Super-elementen für Knoten von Tragstrukturen am Beispiel des Knotens 9 der FINO1-Plattform

### 5.4 Richtungsseegang

Üblicherweise werden die Lasten aus Seegang für Offshore-Tragstrukturen im Zeitbereich berechnet, indem lineare Einzelwellen unterschiedlicher Höhe, Periode und Phase überlagert werden (vgl. Abschnitt „Seegangs- und Wellenlasten“). Dabei wird angenommen, dass die Wellenkämme unendlich lang sind, so dass alle Wellen eines Seegangszustandes in eine Richtung fortschreiten.

Dies führt im Vergleich zu den Messergebnissen an der FINO1-Plattform zu ungenauen Vorhersagen der Ermüdungsbeanspruchung, da in der Realität ein Seegangszustand zusätzlich zu den genannten Parametern

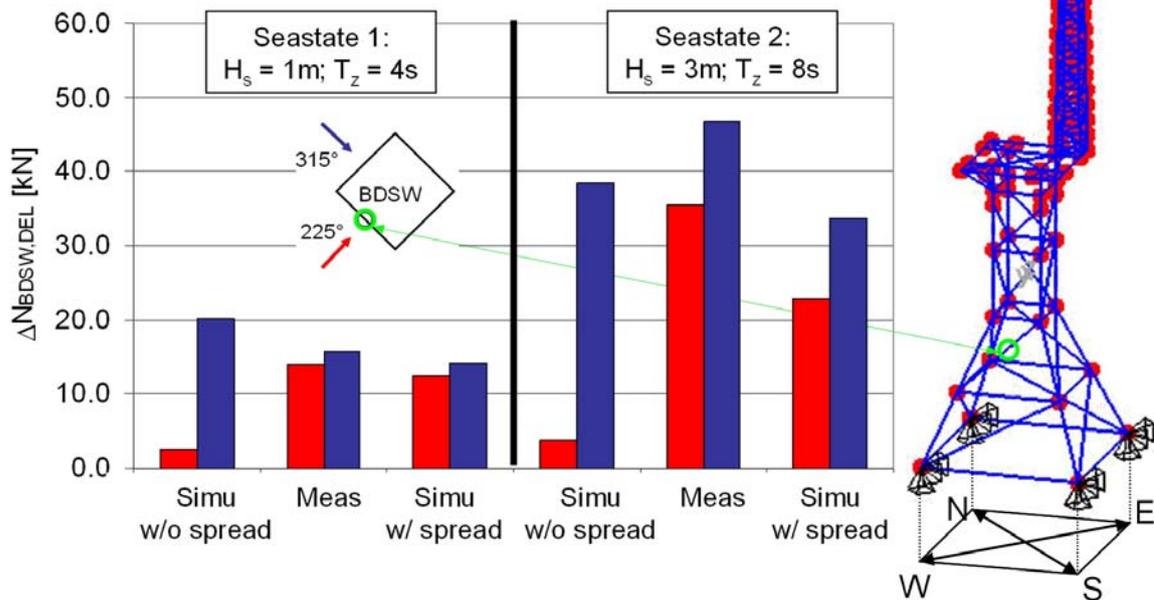


Bild 5-4: Vergleich von gemessenen mit simulierten schädigungsäquivalenten Normalkräften am Detail BDSW.

durch Wellen unterschiedlicher Richtung gekennzeichnet ist. Diese Verteilung der Wellenrichtungen in einem Kurzzeitseegangszustand wird im üblichen Sprachgebrauch mit dem englischen Begriff „wave spreading“ bezeichnet.

Zur numerischen Umsetzung der Berücksichtigung des wave spreadings in Seeganglastsimulationen sei an dieser Stelle auf Ergebnisse des Teilprojektes „Seegangs- und Wellenlasten“ sowie auf *Mittendorf (2006)* verwiesen. Die dort beschriebenen Simulationsverfahren wurden in das oben beschriebene Strukturmodell integriert und konnten anhand von Strukturmessdaten der Forschungsplattform FINO1 verifiziert werden. Dazu wurden zwei Seegangszustände mit  $H_{s,1} = 1 \text{ m}$  und  $T_{z,1} = 4 \text{ s}$  sowie  $H_{s,2} = 3 \text{ m}$  und  $T_{z,2} = 8 \text{ s}$  für zwei unterschiedliche mittlere Seegangsrichtungen  $225^\circ$  und  $315^\circ$  simuliert. In Bild 5-4 sind die sich ergebenden schädigungsäquivalenten Normalkräfte in einer der Diagonalstreben der Plattform den gemessenen Werten gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Berücksichtigung des wave spreadings qualitativ zu einer deutlich besseren Übereinstimmung von Messung und Simulation führt. Der Offset in den Ergebnissen ist durch den in der Simulation vernachlässigten Einfluss des Windes zu erklären.

Weitergehende Untersuchungen haben ergeben, dass die rechnerischen Schädigungen abhängig von dem betrachteten Strukturdetail, den vorliegenden Umgebungsbedingungen sowie der Gesamtstruktur um bis zu 70% reduziert werden können, vgl. *Schaumann & Böker (2007a)* und *Schaumann & Böker (2007b)*.

## 6 Literaturverzeichnis

### 6.1 Veröffentlichungen der GIGAWIND-Mitglieder auf dem Gebiet der Offshore-Windenergie

- Zielke, W. [Hrsg.] (2005): Jahresbericht 2004 zum Forschungsprojekt „Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2“, Kurztitel „GIGAWIND*plus*“. Universität Hannover, April 2005
- Zielke, W. [Hrsg.] (2006): Jahresbericht 2005 zum Forschungsprojekt „Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2“, Kurztitel „GIGAWIND*plus*“. Universität Hannover, April 2006
- Zielke, W. [Hrsg.] (2007): Jahresbericht 2006 zum Forschungsprojekt „Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2“, Kurztitel „GIGAWIND*plus*“. Leibniz Universität Hannover, April 2007.
- Zielke, W. [Hrsg.] (2002): Jahresbericht 2001 zum Forschungsprojekt „Bau- und umwelttechnische Aspekte von Offshore-Windenergieanlagen“, Kurztitel „GIGAWIND“. Universität Hannover, 2002.
- Zielke, W. [Hrsg.] (2003): Jahresbericht 2002 zum Forschungsprojekt „Bau- und umwelttechnische Aspekte von Offshore-Windenergieanlagen“, Kurztitel „GIGAWIND“. Universität Hannover, 2003.
- Zielke, W. [Hrsg.] (2004): Jahresbericht 2003 zum Forschungsprojekt „Bau- und umwelttechnische Aspekte von Offshore-Windenergieanlagen“, Kurztitel „GIGAWIND“. Universität Hannover, 2004.
- Zielke, W. [Hrsg.] (2004): Abschlussbericht 2000 – 2004 zum Forschungsprojekt „Bau- und umwelttechnische Aspekte von Offshore-Windenergieanlagen“, Kurztitel „GIGAWIND“. Universität Hannover, 2004.

Die Jahresberichte stehen als Download auf [www.gigawind.de](http://www.gigawind.de) zur Verfügung.

- Achmus, M.; Abdel-Rahmann, K. (2005): Tragverhalten von Monopile- und Bucketgründungen, 4. GIGAWIND-Symposium, Hannover, 2005.
- Blümel, M. (2004): Untersuchungen zu Seegangslasten auf Offshore-Windenergieanlagen. Diplomarbeit, Institut für Strömungsmechanik, Hannover, 2004.
- Blümel, M.; Mittendorf, K.; Zielke, W. (2005): Validierung des Computerprogramms "WaveLoads" zur Berechnung von Seegangskräften. 5. FZK-Kolloquium: "Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke", Hannover, März 2005.
- Blümel, M.; Zielke, W. (2006): Vergleich der Messungen mittels Seegangsboje und Radar an der Forschungsplattform FINO 1. Technischer Bericht, Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover, 2006.

- Blümel, M.; Zielke, W. (2007): Vergleich von Seegangsmessungen mit Boje und Radar an der Plattform FINO 1. 5. Symposium Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 2007.
- Elmer, K.-H. (2007): Schallemission beim Rammen von Offshore-Fundamenten. 2. Wissenschaftstage des Bundesumweltministeriums zur Offshore-Windenergienutzung, Berlin, 20.-21. Februar 2007.
- Elmer, K.-H.; Gerasch, W.-J. (2007): Schallemission und Minderungsmaßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen. 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, April 2007.
- Elmer, K.-H.; Gerasch, W.-J. et al. (2006): Standard Procedures for the Determination and Assessment of Noise Impact on Sea Life by Offshore Wind Farms, in: Offshore Wind Energy, Köller, Köppel, Peters (eds), Springer Verlag, 2006.
- Elmer, K.-H.; Gerasch, W.-J.; Neumann, T.; Gabriel, J.; Betke, K.; Schultz v. Glahn, M. (2006): Measurement and Reduction of Offshore Wind Turbine Construction Noise, DEWEK 2006 Conference, Bremen, 22.-23. Nov. 2006.
- GL (2005): Rules and Regulations. Offshore Windenergy Converters. Germanischer Lloyd, Hamburg.
- Grabe, J.; Dührkop, J.; Mahutka, K.-P. (2004): Monopilegründungen von Offshore-Windenergieanlagen – Zur Bildung von Porenwasserüberdrücken aus zyklischer Belastung. Bauingenieur, 79. Jahrgang, Ausgabe 09/2004.
- Haake, G. (2007): Validierung von Strukturmodellen mit Messdaten aus natürlicher Erregung. Beitrag zum 2. nationalen PhD-Seminar der EAWE (Deutsche Sektion), Hannover, 22.-23. März 2007.
- Haake, G.; Gerasch, W.-J.; Rolfes, R. (2005): Identifikation der Eigenschwingungsgrößen von OWEA mit Hilfe der natürlichen Erregung. GIGAWIND-Symposium, Universität Hannover, 2005.
- Haake, G.; Gerasch, W.-J.; Rolfes, R. (2007): Tragstruktur – Dynamik des Gesamtmodells und Systemidentifikation. 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, April 2007.
- Hinz, P.; Lesny, K.; Richwien, W. (2006): Prediction Of Monopile Deformation Under High Cyclic Lateral Loading. In: Proceedings of the 8th German Wind Energy Conference, DEWEK, Bremen.
- Hinz, P.; Lesny, K.; Richwien, W. (2007a): Prognose des Langzeitverhaltens von Monopilegründungen. In: Tagungsband zum HTG-Kongress vom 12.-15. September 2007, Dresden.
- Hinz, P.; Lesny, K.; Richwien, W. (2007b): Vorgehensweise bei der FE-Analyse von Monopiles unter hohen Zyklenzahlen. In: Dokumentation zum 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 18. April 2007.
- Kisse, A.; Lesny, K.: Reliability based design of the foundation of an offshore wind energy converter using the Single Surface Hardening Model. In: Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP10) 2007, Tokio, Japan, 2007.
- Kleineidam, P. (2005): Zur Bemessung der Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen gegen Ermüdung. Dissertation, Universität Hannover, 2005.

- Kleineidam, P.; Schaumann, P. (2005): Evaluation of Different Damage Prediction Methods for Support Structures of Offshore Wind Energy Converters. ISOPE 2005, 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 19.-24.6.2005, 06/2005.
- Kohlmeier, M.; Habbar, A.; Mittendorf, K.; Zielke, W. (2007): Integrale Last- und Strukturmodellierung von OWEA – Stand der Entwicklung. 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 2007.
- Kohlmeier, M.; Mittendorf, K.; Kossel, T.; Habbar, A.; Zielke, W. (2007): Application of wave load prediction methods in offshore wind turbine modelling and its influence on the fatigue load analysis. European Offshore Wind Conference & Exhibition 2007, Berlin, 2007.
- Kossel, T. (2006): Wellenbelastungen auf die Tragstrukturen von Offshore-Konstruktionen. Diplomarbeit, Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover, 2006.
- Kossel, T.; Mittendorf, K.; Habbar, A.; Zielke, W. (2007): Elastodynamische Analyse des Windmessmasts Amrumbank West unter Lasten aus unregelmäßigem Richtungsseegang. 2. nationales PhD-Seminar der EAWE (Deutsche Sektion), Hannover, 2007.
- Lee, H. L., Focht, J. A. jr. (1976): Cyclic Testing of Soil for Ocean Wave Loading Problems. Marine Geotechnology, Volume 1, Number 4, Russak & Company, Inc, New York, 1976.
- Lesny, K.: Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen – Ein Systemvergleich. In: Tagungsband zum HTG-Kongress vom 12.-15. September 2007, Dresden.
- Lesny, K.; Funke, G.; Jakubiec, K. (2005): Saugrohrgründungen für Offshore-Windenergieanlagen, dargestellt am Beispiel der Hexafix-Gründungsstrebenstruktur. In: Tagungsband zum HTG-Kongress 2005, Bremen, S. 285-296.
- Lesny, K.; Hinz, P. (2006): A concept for a Safe and Economic Design of Foundations for Offshore Wind Energy Converters. In: New Approach to Harbour, Coastal Risk Management and Education, Proc. of LITTORAL 2006, Gdansk, Polen, S. 90-98.
- Lesny, K.; Hinz, P. (2007): Investigation of Monopile Behaviour under Cyclic Lateral Loading. 6th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics, 11.-13. September 2007, London.
- Lesny, K.; Paikowsky, S. G.; Gurbuz, A. (2007): Scale Effects in Lateral Load Response of Large Diameter Monopiles. In: Proc. of the GeoCongress 2007, Denver, USA.
- Lesny, K.; Richwien, W. (2004): Mindestanforderungen an die Baugrunderkundung. 3. Tagung Offshore-Windenergie, Germanischer Lloyd, Hamburg.
- Lesny, K.; Richwien, W. (2005): Bemessung von Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. In: Tagungsband zum HTG-Kongress 2005, Bremen, S. 253-264.
- Lesny, K.; Richwien, W.; Hinz, P.: Bemessung von Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen. In: Dokumentation zum 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 18. April 2007.
- Lesny, K.; Wiemann, J. (2005): Design aspects of monopiles in German offshore wind farms. In: Proc. of the Int. Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2005), Perth, Australien, S. 383-389, 2005.

- Mittendorf, K. (2006): Hydromechanical Design Parameters and Design Loads for Offshore Wind Energy Converters. Dissertation, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover, 2006.
- Mittendorf, K.; Habbar, A.; Zielke, W. (2005a): Zum Einfluss der Richtungsverteilung des Seegangs auf die Beanspruchung von OWEA. 4. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, September 2005.
- Mittendorf, K.; Kohlmeier, M.; Habbar, A.; Zielke, W. (2005b): Modular Concept for Integrated Modeling of Offshore WEC Applied to Wave-Structure Coupling. Proc. of EUROMECH Colloquium 464: Wind Energy, October 4 – 7, Oktober 2005.
- Mittendorf, K.; Kohlmeier, M.; Habbar, A. and Zielke, W. (2006a): Influence of irregular wave kinematics description on fatigue load analysis of offshore wind energy structures. Proceedings of the 8th German Wind Energy Conference, DEWEK, Bremen, 2006.
- Mittendorf, K.; Kohlmeier, M.; Habbar, A.; Zielke, W. (2007): Seegangslasten und Strukturantworten den Messplattformen FINO 1 und Amrumbank; 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 2007.
- Mittendorf, K.; Kohlmeier, M.; Habbar, A.; Zielke, W.; Peinke et. al (eds) (2006b): A Modular Concept for Integrated Modeling of Offshore WEC Applied to Wave-Structure Coupling. Wind Energy – Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 293-296, ISBN 3-540-33865-9, 10/2006.
- Mittendorf, K.; Nguyen, B.; Blümel, M. (2005c): WaveLoads – A computer program to calculate wave loading on vertical and inclined tubing – User Manual, Version 1.01. Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover, 2005
- Mittendorf, K.; Zielke, W. (2004a): A Hind-Cast Data Base for the Design of Offshore Wind Energy Structures in the German Bight. 29th ICCE, Lisbon, 2004.
- Mittendorf, K.; Zielke, W. (2004b): Nonlinear Irregular Wave Forces on the Support Structure of Wind Energy Turbines. 3rd World Wind Energy Conference WWEC, Beijing, 2004.
- Mittendorf, K.; Zielke, W. (2004c): Extreme Wave Loads on the Support Structure of OWECs. 7th German Wind Energy Conference DEWEK, Wilhelmshaven, 2004.
- Mittendorf, K.; Zielke, W. (2005): Auftrittswahrscheinlichkeit extremer Wellen und Winde. 5. FZK-Kolloquium: "Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke", Hannover, März 2005.
- Nitsche, R.; Nettingsmeier, J.; Rutkowski, T.; Wriggers, P.; Schaumann, P.: Numerische Berechnungen des Tragverhaltens von gleitfest-vorgespannten Schraubverbindungen unter Berücksichtigung der Adhäsion. Der Bauingenieur Ausgabe 2/2007 Seite 77-84. Springer Verlag, 02/2007.
- Richwien, W.; Lesny, K. (2004): Kann man Kolke an Offshore-Windenergieanlagen berechnen? In: Beiträge zum BAW-Workshop "Boden- und Sohl-Stabilität – Betrachtungen an der Schnittstelle zwischen Geotechnik und Wasserbau", Karlsruhe, S. 6-1 - 6-8, 2004.
- Richwien, W.; Lesny, K. (2007): Herausforderungen für die Forschung im Küsteningenieurwesen am Beispiel der Offshore-Windenergie. In: Hansa 144, Heft 2, 2007, S. 68-72, 2007.

- Richwien, W.; Lesny, K.; Hinz, P. (2005): Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen, Forschungsprojekt GIGAWIND*plus*, Jahresbericht 2004, Kapitel Tragstruktur – Gründung.
- Richwien, W.; Lesny, K.; Hinz, P. (2007a): Standard Baugrunderkundung für die Planung von OWEA - Erste Erfahrungen bei der praktischen Anwendung. In: Dokumentation zum 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 18. April 2007.
- Richwien, W.; Lesny, K.; Hinz, P. (2007b): Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2, Forschungsprojekt GIGAWIND*plus*, Jahresbericht 2006, Kapitel Tragstruktur – Gründung.
- Rolfes, R.; Gerasch, W.-J.; Haake, G.; Reetz, J.; Zerbst, S. (2006): Early Damage Detection System for Towers and Rotor Blades of Offshore Wind Turbines. Proceedings of the Third European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), S. 455-462, 5.-7. Juli 2006, Granada. DEStech Publications, Inc. Granada, 2006.
- Rolfes, R.; Lynch, J.; Gerasch, W.-J.; Haake, G.; Reetz, J.; Zerbst, S. (2007): Integral SHM-System for Offshore Wind Turbines Using Smart Wireless Sensors. Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, 11.-13. September 2007, Stanford. DEStech Publications, Inc., 2007.
- Schallück, C. (2005): Beanspruchung eines Schrägzylinders durch Wellenbelastung, Studienarbeit, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover, 2005.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2005a): Can Jackets and Tripods compete with Monopiles? Copenhagen Offshore Wind 2005, Kopenhagen. In: Proceedings of the conference, published on CD, 2005.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2005b): Lebensdaueranalyse von Offshore-Tragstrukturen unter Verwendung der FINO-Messdaten. 4. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, 27. September 2005.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2006): Influence of Wave Spreading in Short-term Sea States on the Fatigue of Offshore Support Structures at the Example of the FINO1-Research Platform. DEWEK 2006, Bremen, 2006.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2007a): Influence of Wave Spreading in Short-term Sea States on the Fatigue of Offshore Support Structures at the Example of the FINO1-Research Platform. DEWI-Magazin Nr. 30, Wilhelmshaven, Februar 2007.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2007b): Considering the distribution of wave directions in the fatigue design of support structures for offshore wind turbines. In: Proceedings of the EWEC 2007, Milan.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2007c): Ermüdungsbeanspruchung aus Seegang bei aufgelösten Tragstrukturen. Stahlbau 76 (2007), Heft 9, 09/2007.
- Schaumann, P.; Böker, C. (2007d): Tragstruktur – Lebensdaueranalysen und Prognoseverfahren. 4. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 12. April 2007.
- Schaumann, P.; Böker, C.; Rutkowski, T.; Wilke, F. (2007a): Tragstrukturen für Windenergieanlagen. Stahlbau-Kalender 2007, Verlag Ernst&Sohn, ISBN13: 978-3-433-01834-7, 04/2007.

- Schaumann, P.; Böker, C.; Wilke, F. (2005): Lebensdaueranalyse komplexer Tragstrukturen unter Seegangsbeanspruchung. Stahlbau 74, S. 406-411, 06/2005. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.
- Schaumann, P.; Keindorf, C. (2007a): Enhancing Fatigue Strength by Ultrasonic Impact Treatment for Welded Joints of Offshore Structures. Third International Conference on Steel and Composite Structures (ICSCS07), Manchester, UK, ISBN 0415451418, 07/2007.
- Schaumann, P.; Keindorf, C. (2007b): Steigerung der Lebensdauer von Schweißverbindungen durch UIT. 5. GIGAWIND-Symposium, Offshore-Windenergie, Hannover, 18.04.2007.
- Schaumann, P.; Keindorf, C.; Matuschek, J.; Stihl, T. (2006): Schalenbeulen von Sandwichzylindern mit einem neuen Elastomer als Verbundwerkstoff. "Stahlbau", Heft 9, 75. Jahrgang, Ernst & Sohn Verlag, 2006.
- Schaumann, P.; Keindorf, C.; Tomasch, F. (2007b): Experimentelle und numerische Untersuchungen von Knotenverbindungen für Tripods von Offshore-Windenergieanlagen. Stahlbau 76 (2007), Heft 9, 09/2007,
- Schaumann, P.; Kleineidam, P. (2004): Efficient Fatigue Design for Tripod Structures in North and Baltic Seas, 7th German Wind Energy Conference DEWEK, Wilhelmshaven, 2004.
- Schaumann, P.; Kleineidam, P.; Marten, F. (2004a): Fatigue design of support structures of Offshore Wind Energy Converters, Nordic steel conference 2004, Copenhagen, 2004.
- Schaumann, P.; Kleineidam, P.; Wilke, F. (2004b): Fatigue Design bei Offshore-Windenergieanlagen. Stahlbau 73, S. 716-726. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2004.
- Schaumann, P.; Marten, F. (2005): Auch der Rückbau kostet Geld – Ein Vergleich der Rückbaukosten von verschiedenen WEA-Tragstrukturen. Wind-Kraft Journal, Heft 4/2005, 09/2005.
- Schaumann, P.; Oswald, B. (2005): Die Windenergie geht Offshore. Universität Hannover, Unimagazin, Ausgabe 1/2, 2005, S18-21, 06/2005.
- Schaumann, P.; Rutkowski, T. (2006): Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., ISBN: 3-8167-7104-1, 2006.
- Schaumann, P.; Wilke, F. (2005): Current Developments of Support Structures in Offshore Environment. ICASS '05; Advances in Steel Structures; 13-15 June 2005; Shanghai, China, 06/2005.
- Schaumann, P.; Wilke, F. (2006a): Benefits of Fatigue Assessment with Local Concepts. In: Peinke et. al (eds), Wind Energy - Proceedings of the Euromech Colloquium, pp. 293-296, ISBN 3-540-33865-9, Springer, 2006.
- Schaumann, P.; Wilke, F. (2006b): Fatigue of Grouted Joint Connections. DEWEK 2006 – Proceedings of the 8th German Wind Energy Conference, Bremen, 11/2006.
- Schaumann, P.; Wilke, F. (2007a): Design of Large Diameter Hybrid Connections Grouted with High Performance Concrete. In: Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007, pp. 340-347, ISBN 978-1-880653-68-5, 07/2007.

- Schaumann, P.; Wilke, F. (2007b): Grouted Joints für Offshore-WEA. 5. GIGAWIND-Symposium, Offshore-Windenergie, Hannover, 18.04.2007.
- Schaumann, P.; Wilke, F. (2007c): Fatigue Assessment of Support Structures for Offshore Wind Energy Conversion Systems ForWind Annual Report 2006, pp. 36-40, 07/2007,.
- Schüttendiebel, R. (2004): Untersuchungen zu stochastischen Seegangsbeanspruchungen im Vergleich zu Messungen an der Plattform FINO 1. Diplomarbeit, Institut für Stahlbau, Universität Hannover, 2004.
- Stewart, H. (1986): Permanent Strains from Cyclic Variable Amplitude Loadings. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, Number 6, 1986.
- Stöcker, T.; Kempfert, H.-G. (2005): Numerische Modellierungen mit einem zyklisch-viskoplastischen Stoffansatz für granulare Böden. Bautechnik 82, Heft 1, Ernst & Sohn Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- Wiemann, J. (2004): Zur Anwendbarkeit von Standardverfahren zur Bemessung von Pfählen für Offshore-Windenergieanlagen. In: 28. Baugrundtagung Leipzig, Spezialsitzung "Forum für junge Geotechnik-Ingenieure", Leipzig, S. 44-45, 2004.
- Wiemann, J. (2005): Bemessungsverfahren für horizontal belastete Pfähle - Untersuchungen zur Anwendbarkeit der p-y Methode. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Verlag Glückauf GmbH, 2005.
- Wiemann, J. (2007): Bemessungsverfahren für horizontal belastete Pfähle - Untersuchungen zur Anwendbarkeit der p-y Methode. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, Verlag Glückauf GmbH, 2007.
- Wiemann, J., Lesny, K.; Richwien, W. (2004): Evaluation of pile diameter effects on soil-pile stiffness. DEWEK, Wilhelmshaven, 2004.
- Zerbst, S.; Reetz, J.; Gerasch, W.-J.; Rolfes, R.: Methoden zur Schadenserkennung an Tragstrukturen von Windenergieanlagen. 5. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, April 2007.
- Zielke, W.: Modellvalidierung mit FINO-Messdaten im Projekt GIGAWIND. 4. Tagung Offshore WindEnergie, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Hamburg, Juni 2005.
- Zielke, W.; Göthel, O. (2005): Kann man Kolk berechnen?. 4. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, September 2005.

## 6.2 Sonstige Literatur

- Abaqus (2003): Abaqus/ Standard Version 6.4, Abaqus Inc., Pawtucket, USA.
- API [Hrsg.] (2000): Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design, RP 2A-WSD, 21<sup>st</sup> ed. American Petroleum Institute, Washington D.C., USA, 2000.
- Argyriadis, K. et al. (2005): Forschungsplattform FINO1 – einige Messergebnisse. In: Tagungsband zur 4. Tagung Offshore WindEnergie. Germanischer Lloyd, Hamburg, Juni 2005.

- Ashour, M.; Norris, G. (2000): Modelling Lateral Soil-Pile Response based on Soil-Pile Interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, May 2000.
- Ashour, M.; Norris, G. (2003): Lateral Loaded Pile Response in Liquefiable Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, May 2003.
- Ashour, M.; Norris, G.; Pilling, P. (1998): Lateral Loading of a Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp. 303-315, 1998.
- Ashour, M.; Norris, G.; Pilling, P. (2002): Strain Wedge Model Capability of Analyzing Behavior of Laterally Loaded Isolated Piles, Drilled Shafts and Pile Groups. *Journal of Bridge Engineering*, July/August 2002.
- Bathe, K.-J. (1990): *Finite-Elemente-Methoden*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- Brincker, R.; Ventura, C. E.; Andersen, P. (2003): Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Kissimmee, Florida, February 2003.
- Brincker, R.; Zhang, L. (2000): Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, February 7-10, 2000, p. 625-630.
- Bühler, M. M. (2006): *Experimental and Numerical Investigations of Soil-Foundation-Structure Interaction during Monotonic, Alternating and Dynamic Loading*, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, Karlsruhe, Heft 166, 2006.
- Buitrago, J. (1993); Healy, B.E.; Chang, T. Y.: Local joint flexibility of tubular joints. *Offshore Technology Conference*, ASME, Volume 1, pp. 405-416, 1993.
- Chakrabarti, S. K. (1987): *Hydrodynamics of Offshore Structures*. ISBN 0-905451-66-X, Springer-Verlag, New York, 1987.
- Clauss, G.; Lehmann, E.; Østergaard, C. (1988): *Meerestechnische Konstruktionen*, Springer Verlag, 1988.
- Dau, H. (2006): *Auswertung der Messdaten Amrumbank West*, Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen (in Vorbereitung).
- Dennis, John E.; Gay, David M.; Welsch, Roy E. (1981): An adaptive nonlinear least-squares algorithm, *ACM Transactions on Mathematical Software*, September, 1981.
- DNV-OS-J101: *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. Det Norske Veritas Offshore Standard. June 2004.
- Dobson, F. W. (1982): Review of reference height for and averaging time of surface wind measurements at sea. *WMO Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report*, 3.
- El-Fares-Ziegler, A. (2001): *Spezielle Projektionsmethoden zur Lösung von Eigenwertproblemen und zur Bestimmung von Singulärwertzerlegungen*. *Berichte aus der Mathematik*, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8322-0113-0, 2002.

- Festag, G. (2003): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Verhalten von granularen Materialien unter zyklischer Beanspruchung. Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik, Technische Universität Darmstadt, Heft 66, 2003.
- Forristall, G.Z.; Ward, E.G.; Cardone, V.J.; Borgmann, L.E. (1978): The Directional Spectra and Kinematics of Surface Gravity Waves in Tropical Storm Delia, Journ. of Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 888-909, 1987.
- Gawronski, W. K. (1998): Dynamics and Control of Structures – A Modal Approach. Mechanical Engineering Series, Springer-Verlag, New York, Inc., ISBN 0-387-98527-1, 1998.
- Gerasch, W.-J. (2005): Schwingungsprobleme im Bauwesen, Skriptum, Hannover, 2005.
- Gören, P.; Dorrstein, R. (1976): KNMI Opstellen op Oceanografisch en Maritiem Meteorologisch Gebied. Zeegloven, 11, 124pp, 1976.
- Gotschol, A. (2002): Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. Heft 12, Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel, 2002.
- Grabe, J.; Dührkop, J.; Mahutka, K.-P. (2004): Monopilegründungen von Offshore-Windenergieanlagen – Zur Bildung von Porenwasserüberdrücken aus zyklischer Belastung. Bauingenieur, 79. Jahrgang, Ausgabe 09/2004.
- Groth, C.; Müller, G. (2000): FEM für Praktiker, 5. Auflage. ISBN 3-8169-1857-3, expert verlag, Renningen-Malsheim, 2000.
- Guyan, R.J. (1965): Reduction of Stiffness and Mass Matrices, AIAA Journal, Vol. 3, Nr. 2, p. 380, 1965.
- Haibach, E. (1989): Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Hapel, K.-H. (1990): Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter Offshore-Konstruktionen. Vieweg, Braunschweig, 1990.
- Hasselmann, K. et al. (1973): Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). DeutscheHydrograph, Zeit., 1973.
- HSE (2002): The effects of local joint flexibility on the reliability of fatigue life estimates and inspection planning. Offshore Technology Report 2001/056, HSE Books, Sudbury, ISBN 0 7176 2288 6, 2002.
- Ibso, J. B. (2003): Fatigue design of offshore wind turbines and support structures, Det Norske Veritas, OWEMES 2003 - Offshore Wind Energy in Mediterranean and other European Seas. Naples, Campania (Italien), 2003.
- IMS (2002): Ausführungsstatik FINO 1, IMS Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg, 2002
- Kahma, K. K. (1981): A study of the growth of the wave spectrum with fetch. Journal of Physical Oceanography 11: 1503-1515.
- Kleineidam, P. (2005): Zur Bemessung der Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen gegen Ermüdung. Dissertational thesis, University of Hannover. Shaker-Verlag, ISBN 3-8322-3669-4.
- Klumpjan, P. (2007): Anwendung des Strain-Wedge-Modells auf Monopile-Gründungen. Diplomarbeit Nr. 110 am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Duisburg-Essen (unveröffentlicht).

- Knothe, K.; Wessels, H. (1992): Finite Elemente. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- Kramer, H. et al. (1992): Empfehlungen des Arbeitskreises 9 „Baugruddynamik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Ernst & Sohn, Bautechnik 69 Heft 9, Juli 1992.
- Lenzen, A. (1994): Untersuchung von dynamischen Systemen mit der Singulärwertzerlegung – Erfassung von Strukturveränderungen. Bochum, 1994.
- Lesny, K.; Wiemann, J. (2005): Design aspects of monopiles in German offshore wind farms. In: Proc. of the Int. Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2005), Perth, Australien, S. 383-389.
- Long, J.H.; Vanneste, G. (1994): Effects of Cyclic Lateral Loads on Piles in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 1, January 1994, pp. 225-244.
- LPILE Plus v4.0 for Windows (2000): A program for the analysis of piles and drilled shafts under lateral loads. Ensoft, Inc., Austin, USA.
- Malkus, J. (2000): Untersuchung des Bodenverhaltens im Kontaktbereich von zyklisch axial belasteten Pfählen und Ankern. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Verlag Glückauf GmbH, 2000.
- Mallikarjuna Rao, K. (1992): Behaviour of vertical piles subjected to static and cyclic lateral loading. Ocean Engineering Centre, Indian Institute of Technology, Madras, 1992.
- Marr, W.A.; Christian, J.T. (1981): Permanent Displacements due to cyclic wave loading. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 107, No. GT8, 1998.
- Matlock, H. (1970): Correlations for Design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the II Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas (OTC 1204), 1970.
- Meißner, U.; Menzel, A. (1989): Die Methode der finiten Elemente. Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- Meling, T. S.; Johannessen, Haver, S.; Larsen, K. (2000): Mooring Analysis of a Semi-Submersible by use of IFORM and Contour Surfaces. OMAE 2000 /OSU OFT-4141, New Orleans, 2000.
- Miner, M. A. (1945): Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineers/ Applied Mechanics Division, Vol. 12, pp. 159-164, New York, 1945.
- Mitsuyasu, H. (1977): Measurement of the high-frequency spectrum of ocean. J. Phys. Oceanogr., Vol. 7, pp. 882-891, 1977.
- Mittendorf, K.; Nguyen, B.; Zielke, W. (2002): Seegang und Seegangsbelastung. 2. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 09.02.2002.
- Morison, J. R.; O'Brien, M. P.; Schaaf, S. A.; Johnson, J. W. (1950): The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Trans. AIME, Vol. 189, p.149-157, 1950.
- Munk, W. H. (1951): Origin and generation of waves. Proc. First Coastal Engineering Conference, Long Beach, Calif., 1-4, 1951.
- Natke, H. G. (1983): Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, ISBN 3-528-08145-7, Braunschweig, 1983.

- Neumann, T.; Nolopp, K.; Herklotz, K. (2004): Erste Betriebserfahrungen mit der FINO1-Forschungsplattform in der Nordsee. DEWI-Magazin Nr. 24, Februar 2004.
- Norris, G. (1986): Theoretically Based BEF Laterally Loaded Pile Analysis. 3<sup>rd</sup> International Conference on Numerical Methods in Offshore piling, Nantes, 1986.
- Oumeraci, H. (2004): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Seegangbelastung zylindrischer Seebaustrukturen“ DFG-Geschäftszeichen: Ou 1 / 4-1 und Ou 1 / 4-2, Forschungszentrum Küste, 2004 (unveröffentlicht).
- Overschee, P. van; Moor, B. de (1996): Subspace Identification for Linear Systems. Kluwer Academic Publisher, Boston/London/Dordrecht, 1996.
- Reese, L. C.; Cox, W. R.; Koop, F. D. (1974): Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand, Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference, OTC 2080, Offshore Technology Conference, Houston, 1974.
- Reese, L.C.; Cox, W.R.; Koop, F. D. (1975): Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. Offshore Technology Centre, paper 2312, Dallas, 1975.
- Reese, L.C.; Van Impe, W.F. (2001): Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading. Balkema-Verlag, Rotterdam, 2001.
- Schade, D. (1991): Untersuchungen über das Wellenklima an einer Brandungsküste unter Einschluß der Richtungsstruktur des Seegangs, dargestellt am Beispiel der Insel Sylt. Franzius-Institut, Universität Hannover, Heft 71, 1991.
- Schaumann, P.; Böker, C.; Kleineidam, P. (2003): Development and Evaluation of Different Fatigue Design Methods for OWECs under Wave Loading. EWEC 2003 – European Wind Energy Conference, Madrid 16.-19. June 2003.
- Schlue, B. F. (2005): Analyse des Betriebsverhaltens von Monopiles für Offshore-Windenergieanlagen unter zyklischer Belastung aus Wind und Seegang. Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, 2005.
- Schwarz, H. R. (1984): Methode der finiten Elemente. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1984.
- Shi, D. (1991): Ermittlung modaler Größen von Werkzeugmaschinen im Betriebszustand mit einem AR(ARMA)-Modell, VDI-Verlag, Berlin, 1991.
- Sobey, R. J. (1992): A local Fourier approximation method for irregular wave kinematics, Applied Ocean Research 14, p.93-105, Elsevier Science Publishers Ltd., 1992.
- Stöcker, T. (2002): Zur Modellierung von granularen Materialien bei nichtruhenden Lastwirkungen. Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel, 2002.
- Szczepaniak, M. (2003): Berechnung horizontal gebetteter Pfähle unter quasi-statischen und zyklischen Lasten, Studienarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2003.
- Wang, Z. (2000): Behaviour of soils and foundation structures under cyclic loads. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Verlag Glückauf GmbH, 2000.
- Welch, R.C.; Reese, L.C. (1972): Laterally loaded behavior of drilled shafts. Research Report Nr.: 3-5-65-89. Center for Highway Research. University of Texas, Austin, 1972.
- Wheeler, J.D. (1970): Method for Calculating Forces Produced by Irregular Waves. Journal of Petroleum Technology, Vol. 22, 1970.

- Wichtmann, T. (2005): Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, 2005.
- Wichtmann, T.; Niemunis, A.; Triantafyllidis, T. (2005): Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden unter hochzyklischer Belastung. Bautechnik 82, Heft 1, S.18-27, 2005.
- Wichtmann, T.; Niemunis, A.; Triantafyllidis, T. (2006): Gilt die Minersche Regel für Sand? Bautechnik 83, Heft 5, Ernst & Sohn Verlag GmbH, Berlin, 2006.
- Wiemann, J.; Lesny, K.; Richwien, W. (2002): Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen – Gründungskonzepte und geotechnische Grundlage. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2002.
- Wienke, J. (2001): Druckschlagbelastung auf schlanke zylindrische Bauwerke durch brechende Wellen – theoretische und großmaßstäbliche Laboruntersuchungen – Dissertation TU Braunschweig, 2001.
- WMO (1988): Guide to Wave Analysis and Forecasting. WMO-Report No. 702, Genf, 1988.
- von Wolffersdorff, P.A.; Radu Schwab (2001): Schleuse Uelzen I - Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen. Bautechnik, Heft 11, 2001.
- Young, I. R.; Holland, G. J. (1996): Atlas of the oceans: wind and wave climate. Pergamon, 246 pp + CD-ROM, 1996.
- Zielke, W.; Mittendorf, K. (2004): Seegang und Seegangsbelastung. 3. Symposium Offshore-Windenergie: Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 2004.

### **6.3 Software**

ANSYS: Ansys, Inc., Version 10.0

Matlab: The MathWorks, Inc., Version 7.0.4 (R14) SP2

MSC.Nastran: MSC Software Corporation, Version 2005 R2

WAFO: “Wave Analysis for Fatigue and Oceanography“, Centre for Mathematical Sciences, Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, Version 2.1.1

WaveLoads: Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover