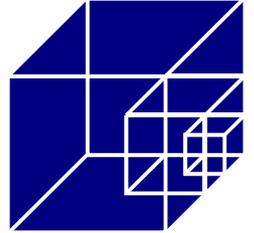


Universität Hannover - Institut für Stahlbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Appelstraße 9a ♦ 30167 Hannover
☎ (0511) 762-3781 FAX (0511) 762-2991
schaumann@stahl.uni-hannover.de
www.stahlbau.uni-hannover.de



4. Symposium

Offshore-Windenergie

Bau- und umwelttechnische Aspekte

Dienstag, 27. September 2005 in Hannover

LEBENSDAUERANALYSE VON OFFSHORE- TRAGSTRUKTUREN UNTER VERWENDUNG DER FINO- MESSDATEN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Dipl.-Ing. Cord Böker



1 Einleitung

Auf die Bedeutung der Lebensdaueranalysen im Zuge der Bemessung von Offshore-Tragstrukturen wurde bereits in den vergangenen Beiträgen zum Symposium Offshore-Windenergie hingewiesen, vgl. [11]. Insbesondere die dynamische Beanspruchung der Strukturen infolge der Seegangbeanspruchung wurde untersucht sowie verschiedene Methoden zur Bemessung der Tragstrukturen gegen Ermüdung wurden entwickelt und vorgestellt [9].

Diese Methoden konnten bislang nur durch Vergleichrechnungen mit anderen Programmen bzw. Plausibilitätskontrollen abgesichert und verifiziert werden. Die Messdaten der FINO-Plattform bieten nun erstmals die Möglichkeit, anhand von Struktur- und Seegangsmessungen die Annahmen, auf denen die verschiedenen Berechnungskonzepte basieren, zu überprüfen und so die Berechnungskonzepte zu validieren.

Der vorliegende Beitrag befasst sich zunächst mit den Daten, die an der FINO-Plattform gewonnen werden. Es wird beschrieben, wie die Daten im Rahmen des Forschungsprojektes GIGAWIND $plus$ verarbeitet und aufbereitet werden, um sinnvoll und effizient mit ihnen arbeiten zu können. Darauf aufbauend werden im Anschluss einige erste Messergebnisse präsentiert, die für Lebensdaueranalysen relevant sind. Anschließend werden diese Messergebnisse für ausgewählte Seegangszustände mit Simulationsergebnissen verglichen und bewertet.

2 FINO-Messdaten

Der Aufbau des Messsystems an der FINO-Plattform ist bereits mehrfach beschrieben worden, vgl. hierzu [16]. Es existieren im Wesentlichen drei verschiedene Messsysteme, deren Daten anhand eines Zeitindexes miteinander in Verbindung gebracht werden können:

- Seegangsmessungen mittels einer Boje
- Windmessungen am Windmessmast
- Strukturmessungen an verschiedenen Detailpunkten der Tragstruktur der Plattform

Für die hier behandelten Fragen der Ermüdung unter Seegangsbeanspruchungen spielen die Windmessungen bisher eine untergeordnete Rolle.

Die Seegangseigenschaften werden von der Boje kontinuierlich mit einer Frequenz von 1,28 Hz aufgezeichnet, was eine Abbildung des Seegangsspektrums bis 0,64 Hz ermöglicht. Zusätzlich zu den Rohdaten werden auch die daraus über einen Zeitraum von 30 Minuten abgeleiteten Seegangsspektren in parametrisierter Form, d.h. durch Angabe von signifikanter Wellenhöhe H_s und Nulldurchgangsperiode T_z , abgespeichert und zur Verfügung gestellt. Dies verringert die zu speichernde Datenmenge deutlich und ermöglicht zudem das rasche Auffinden von Zeitbereichen mit bestimmten charakteristischen Seegangseigenschaften. Diese Bojendaten liegen im Zeitraum von August 2003 bis Januar 2005 nahezu lückenlos vor.

Die Strukturmessungen werden mit einer Frequenz von 10 Hz kontinuierlich an vier über den Umfang verteilten Positionen pro Detail aufgezeichnet. Diese Daten liegen als Zeitreihen der Dehnungen vor und sind für unterschiedliche Zeiträume verfügbar.



Die hohe Aufzeichnungsfrequenz und die Dauer der Aufzeichnung führen innerhalb kurzer Zeit zu sehr großen Datenmengen. Um mit diesen Daten sinnvoll arbeiten zu können, 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 $\mu\text{m/m}$ vorliegen, als auch die gemittelten Werte der Wind- und Seegangsmessungen erfasst. Die Datensätze sind über den Zeitpunkt der Messung in Epochensekunden miteinander verknüpft. Das Datenbankmanagement übernimmt ein Programm namens FINODATA, welches auch gleichzeitig die Integrität der Daten sicherstellt.

Zur Abfrage der Datenbank sowie zur Verarbeitung und Aufbereitung der darin enthaltenen Daten ist das Programm FINOABFRAGE entwickelt worden [15], welches u.a. die Umwandlung von Dehnungen in Spannungen und Schnittgrößen vornimmt, vgl. [16].

Das Zusammenspiel der Programme mit der Datenbank ist in Abbildung 1 illustriert.

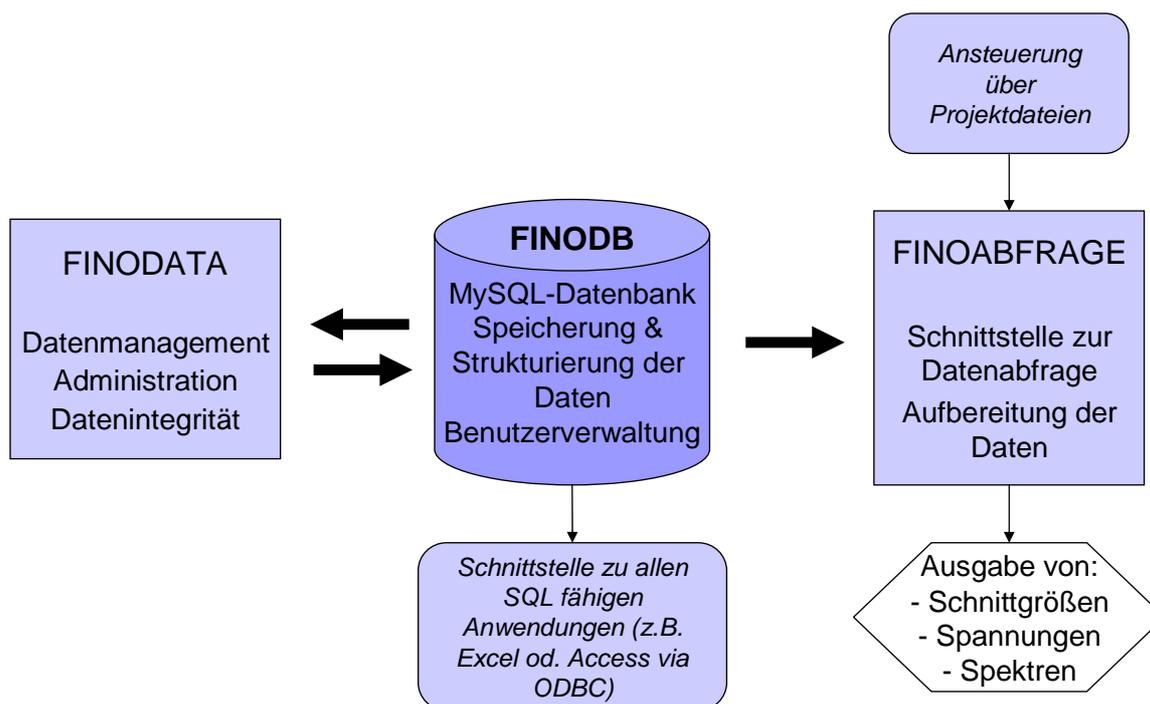


Abbildung 1: Zusammenspiel der Messwertdatenbank FINODB mit Administrationsprogramm FINODATA und Datenaufbereitungsprogramm FINOABFRAGE

Mit Hilfe dieser Datenbank-Architektur ist es möglich, gezielt für Vergleichsrechnungen relevante Zeitbereiche zu identifizieren und die entsprechenden interessierenden Größen aufbereitet abzufragen. Die Schnittstelle zu allen SQL-fähigen Anwendungen ermöglicht eine flexible Analyse der Daten.



2.1 Seegangsmessungen

Für die Bemessung gegen Ermüdung mit der Methode im Zeitbereich sowie im Frequenzbereich ist die Annahme eines Wellenenergiespektrums für einen Kurzzeitseegangszustand erforderlich, vgl. [7], [9]. Die Genauigkeit einer solchen Berechnung hängt also ganz wesentlich von der Annahme ab, dass die in den Bemessungsnormen hierfür angegebenen Bemessungsspektren die realen Verhältnisse hinreichend genau widerspiegeln. Diese Bemessungsspektren sind das Jonswap- bzw. Pierson-Moskowitz-Spektrum. Beide sind in [4] und [3] enthalten und dort formelmäßig angegeben.

In Abbildung 2 sind für einen Kurzzeitseegangszustand, der durch die signifikante Wellenhöhe $H_s = 3.0\text{m}$ sowie die Nulldurchgangsperiode $T_z = 6.2\text{s}$ beschrieben ist, die Seegangsspektren, wie sie sich nach den Bemessungsspektren nach Jonswap bzw. Pierson-Moskowitz ergeben, denen von Messungen am Standort der FINO-Plattform zu verschiedenen Zeitpunkten gegenübergestellt. Die gemessenen Spektren werden insgesamt gut von den analytischen Formulierungen angenähert. Es ist zu erkennen, dass das Jonswap-Spektrum vor allem den schmalen Bereich großer Wellenenergie gut abbildet, während das Pierson-Moskowitz-Spektrum insbesondere im rechten Teil des Spektrums den gemessenen Verlauf gut wiedergibt. Im Weiteren wird daher davon ausgegangen, dass am Standort der FINO-Plattform die realen Eigenschaften des Seegangs durch die Bemessungsspektren ausreichend genau wiedergegeben werden. Für Berechnungen im Zeitbereich wird im Folgenden das Jonswap-Spektrum verwendet.

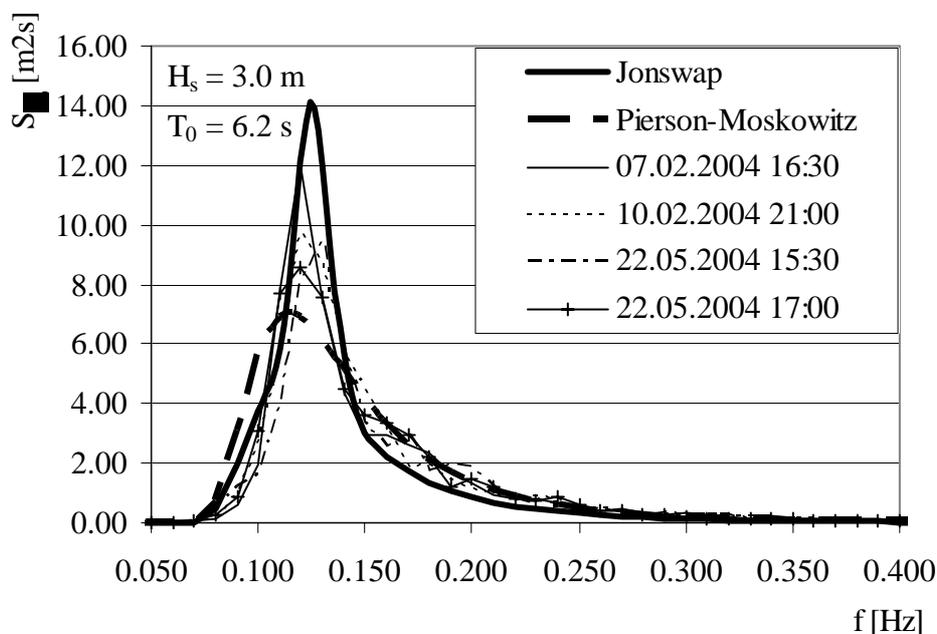


Abbildung 2: Gemessene Seegangsspektren für ähnliche charakteristische Seegangparameter $H_s=3.0\text{m}$, $T_z = 6.2\text{ s}$. Vergleich mit gemittelten Bemessungsspektren Jonswap bzw. Pierson-Moskowitz



Wie eingangs bereits erwähnt, liegen Seegangsmessungen von der Seegangsboje aus dem Zeitraum August 2003 bis Januar 2005 vor. Ein auf den Daten dieses Zeitraums basierendes Wellenverteilungsdiagramm ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt.

	T _z - Klasse [s]														Summe
	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25	8.75	
0.25	1	18	28	19	10	5	1	1							83
0.75		8	58	90	59	29	18	4	2						266
1.25			3	55	85	51	25	13	5	1	1	1	1		240
1.75				1	35	73	46	20	7	1					183
2.25					1	17	43	28	6	1					97
2.75						1	12	26	12	3					54
3.25							2	12	15	8	1				38
3.75								1	5	7	2				15
4.25									1	4	4				9
4.75										1	2	2			6
5.25											1	2	1		5
5.75													1	1	2
6.25													1	1	2
6.75														1	1
Summe	1	26	89	165	190	176	146	104	54	26	12	6	4	3	1000

Abbildung 3: Wellenverteilungsdiagramm für den FINO-Standort basierend auf 12896 ausgewerteten 30-Minuten-Intervallen im Zeitraum August 2003 bis Januar 2005; Häufigkeiten bezogen auf 1000 Kurzzeitseegangszustände

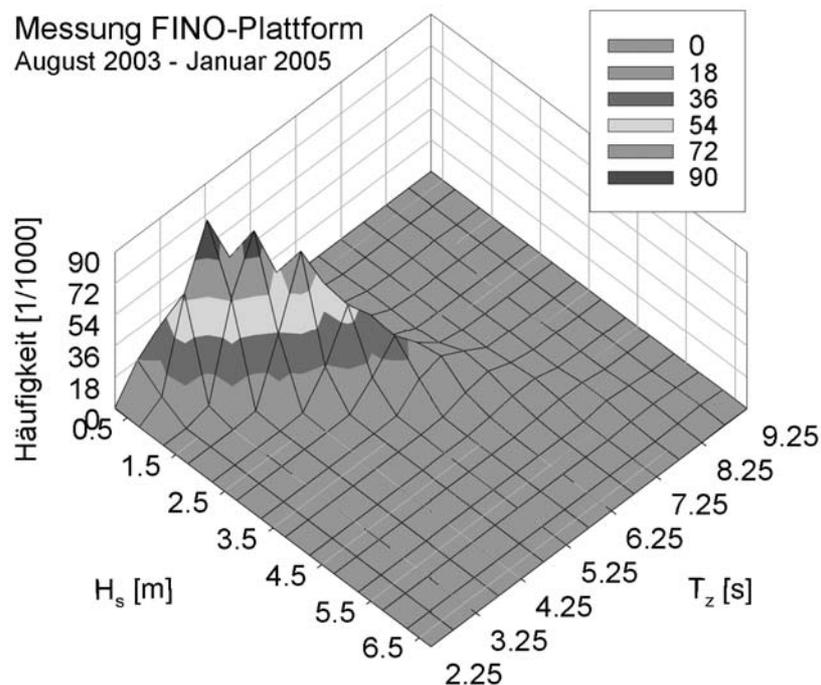


Abbildung 4: Visualisierung des Wellenverteilungsdiagramms aus Abbildung 3.



Das Diagramm basiert auf der Auswertung von 12896 Einzelseegangszuständen, was zusammenhängend in etwa einem dreiviertel Jahr entspricht. Diese relativ kleine Datenbasis ist für eine detaillierte Ausführungsrechnung von Offshore-Tragstrukturen noch nicht ausreichend. Man sieht jedoch bereits die Konzentration der für die Ermüdung maßgebenden Seegangszustände mit kleinen bis mittleren signifikanten Wellenhöhen im Bereich von etwa $T_z = 3$ bis 5 Sekunden. In diesem Bereich werden auch die Eigenfrequenzen von Offshore-Windenergieanlagen erwartet, so dass die Berücksichtigung einer dynamischen Überhöhung unumgänglich ist [7].

Bei einer Langzeitbetrachtung ist neben der Einordnung der Seegangszustände in Wellenhöhen- und Periodenklassen auch die Richtungsverteilung der Seegangszustände von Interesse, da diese einen erheblichen Einfluss auf die zu erwartende Schädigung haben kann. Dies gilt bereits für einfache Tragsysteme wie den Monopile, bei dem die Beanspruchungsrichtung ja zunächst keinen Einfluss auf die maximale Beanspruchung hat. Die Berücksichtigung der Richtungsverteilung über die Lebensdauer kann aber zu einer Reduktion der Ermüdungslasten führen. Insbesondere wirkt sich die Richtungsverteilung aber für komplexe Tragstrukturen aus, da hier auch die maximalen Beanspruchungen von der Beanspruchungsrichtung abhängen. Die Richtungsverteilung der bisher ausgewerteten Daten ist in Abbildung 5 dargestellt. Auch dieses Diagramm basiert auf den 12896 in der Datenbank enthaltenen Kurzzeitseegangszuständen.

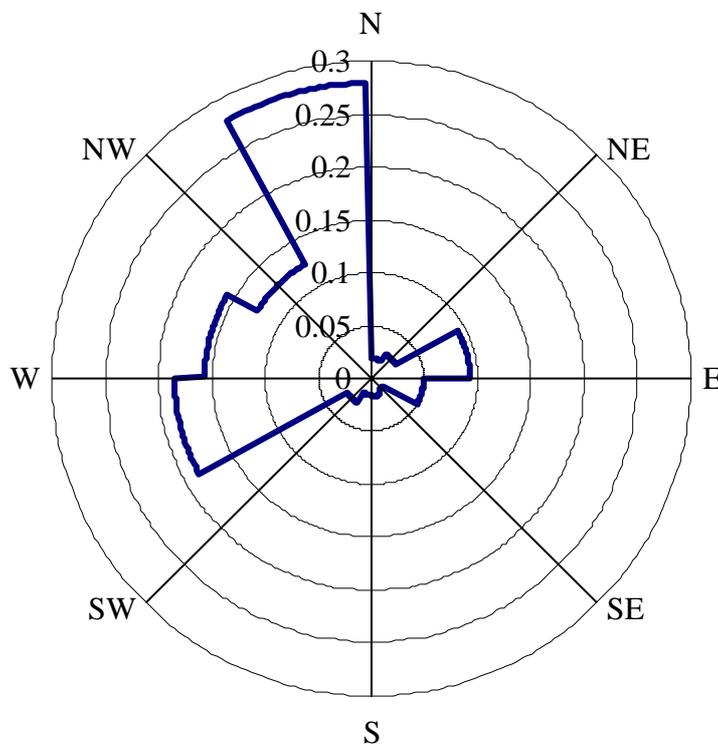


Abbildung 5: Richtungsverteilung der Seegangszustände, basierend auf 12896 ausgewerteten 30-Minuten-Intervallen von August 2003 bis Januar 2005



Wie zu erkennen ist, kommt der größte Teil der Wellen aus einem Sektor, der etwa von Südwesten bis Norden reicht. Dies ist sicherlich durch den Standort der FINO-Plattform zu erklären: die Windeinwirklänge, der so genannte Fetch, ist aus diesen Richtungen besonders lang, so dass sich ausgeprägte Seegangszustände gut aufbauen können. Die knapp 30-50 Seemeilen, die der Standort in den übrigen Richtungen von der Küste entfernt ist, lassen es nicht zu, dass sich ein ausgeprägter Kurzzeitseegangszustand entwickelt. Daher ist auch zu erwarten, dass Extremereignisse ebenfalls aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen auftreten werden, was durch Untersuchungen in [2] bestätigt wird.

2.2 Strukturmessungen

Das oben dargestellte Wellenverteilungsdiagramm basiert auf den Messungen der Seegangsboje im Zeitraum von August 2003 bis Januar 2005, die nahezu lückenlos für diesen gesamten Zeitraum vorliegen. Solche Wellenverteilungsdiagramme werden insbesondere beim Nachweis im Grenzzustand der Ermüdung benötigt, um die langzeitstatistische Verteilung der Seegangslasten zu beschreiben. Ist das Wellenverteilungsdiagramm für einen Standort erst einmal bekannt, können die verschiedenen Nachweismethoden, wie z.B. in [9] beschrieben, zur Anwendung kommen. Allgemein muss dabei für jeden im Wellenverteilungsdiagramm enthaltenen Seegangszustand die entsprechende Teilschädigung ermittelt werden. Die Gesamtschädigung des betrachteten Strukturdetails ergibt sich dann aus der Summe der mit den entsprechenden Häufigkeiten gewichteten Teilschädigungen nach der linearen Schadensakkumulationshypothese, auch Miner-Hypothese genannt. In diesem Sinne stellt also die Teilschädigung eine Möglichkeit dar, einen Seegangszustand bezüglich eines Strukturdetails durch einen einzigen Parameter zu charakterisieren. Dazu ist jedoch immer ein entsprechendes Strukturdetail mit zusätzlichen Angaben, wie der zugehörigen Wöhlerlinie und des Kerbdetails, erforderlich. In [16] wurden als Alternative die schädigungsäquivalenten Lasten vorgestellt, die es unabhängig von Strukturdetails unter Annahme einer konstanten Wöhlerliniensteigung ermöglichen, eine beliebige Beanspruchungszeitreihe, die beispielsweise auch von einem Kurzzeitseegangszustand verursacht sein kann, durch einen Parameter, die schädigungsäquivalente Last, zu beschreiben. Damit ist es möglich, mehrere Seegangszustände mit gleichen charakterisierenden Größen H_s , T_z und Richtung hinsichtlich ihrer Auswirkung auf eine bestimmte Zustandsgröße der Tragstruktur zu vergleichen.

Um eine möglichst breite Datenbasis für weitere Betrachtungen zu erhalten, wurden zunächst für alle in der Datenbank enthaltenen Seegangszustände die schädigungsäquivalente Normalkraft in einer oberen Diagonalstrebe (Detail BDSW in Abbildung 10) sowie das schädigungsäquivalente globale Moment am Meeresboden ermittelt. Zur Ermittlung des globalen Moments siehe [16]. Die schädigungsäquivalenten Lasten wurden dabei jeweils für ein 10-Minuten Intervall berechnet und auf eine Gesamtlebensdauer von 20 Jahren bezogen. Weiterhin wurde eine konstante Wöhlerliniensteigung von $m=4$ sowie eine bezogene Schwingungszahl $n_{\text{äqv}}=2 \cdot 10^8$ angesetzt.

Leider sind die Zeiträume, für die sowohl die benötigten Strukturmessdaten als auch die Seegangsdaten vorliegen, nicht deckungsgleich, so dass für die schädigungsäquivalente Normal-



kraft $N_{\text{BDSW,DEL}}$ insgesamt 3134 und für das schädigungsäquivalente Moment $M_{\text{glob,DEL}}$ 1408 zehnmünütige Intervalle ausgewertet werden konnten.

In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind für jedes ausgewertete Intervall $N_{\text{BDSW,DEL}}$ bzw. $M_{\text{glob,DEL}}$ jeweils in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe dargestellt.

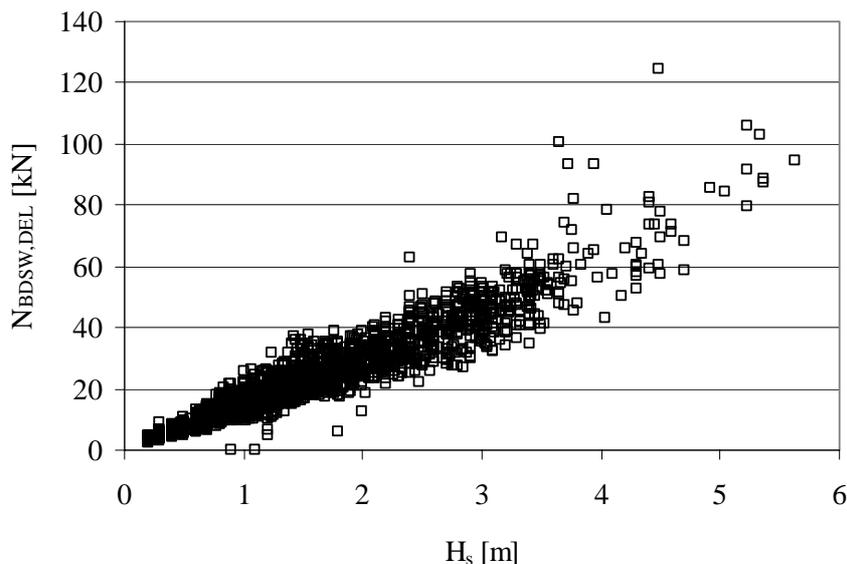


Abbildung 6: Schädigungsäquivalente Normalkräfte $N_{\text{BDSW,DEL}}$ über der signifikanten Wellenhöhe H_s . Auswertung von 3134 10-Minuten-Intervallen.

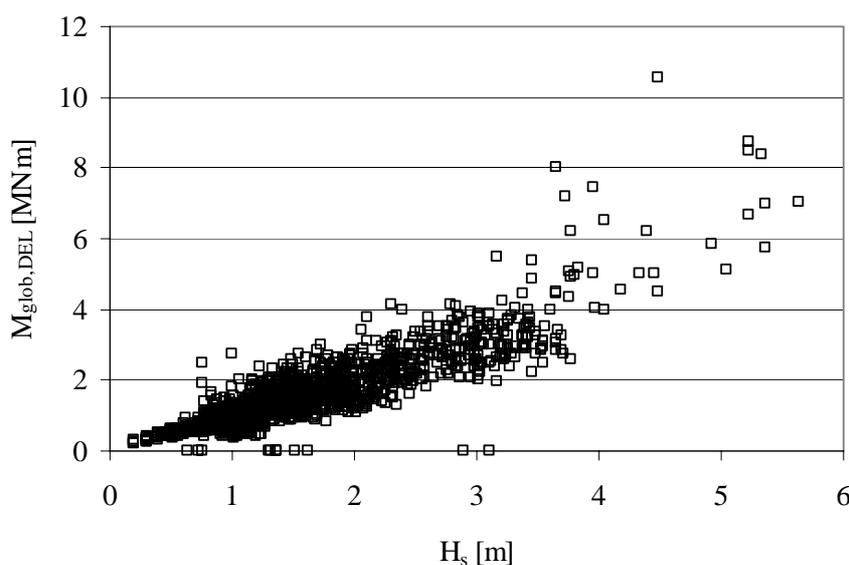


Abbildung 7: Schädigungsäquivalente globale Momente $M_{\text{glob,DEL}}$. Auswertung von 1408 10-Minuten-Intervallen.



Erwartungsgemäß ist die Abhängigkeit der Strukturbeanspruchung von der Wellenhöhe deutlich zu erkennen. Ebenso deutlich ist die Streuung in den gemessenen Ergebnissen. Diese ist durch verschiedene Faktoren bedingt: unterschiedliche Ausprägungen der realen Wellenenergiespektren, unterschiedliche Wellenperioden sowie unterschiedliche Wellenanlaufrichtungen. Für die Bemessungsmethoden von Offshore-Windenergieanlagen ist es von Interesse, ob eine dieser Ursachen für Streuungen einen besonders großen Einfluss auf das Strukturverhalten hat.

Um dies beurteilen zu können, ist es zweckmäßig, bei konstant gehaltener signifikanter Wellenhöhe die Abhängigkeit der betrachteten Zustandsgröße von den angesprochenen Einflüssen zu untersuchen.

In Abbildung 8 ist zunächst die schädigungsäquivalente Normalkraft in der Diagonalstrebe $N_{BDSW,DEL}$ in Abhängigkeit von der Nulldurchgangsperiode T_z bei konstant gehaltener signifikanter Wellenhöhe dargestellt.

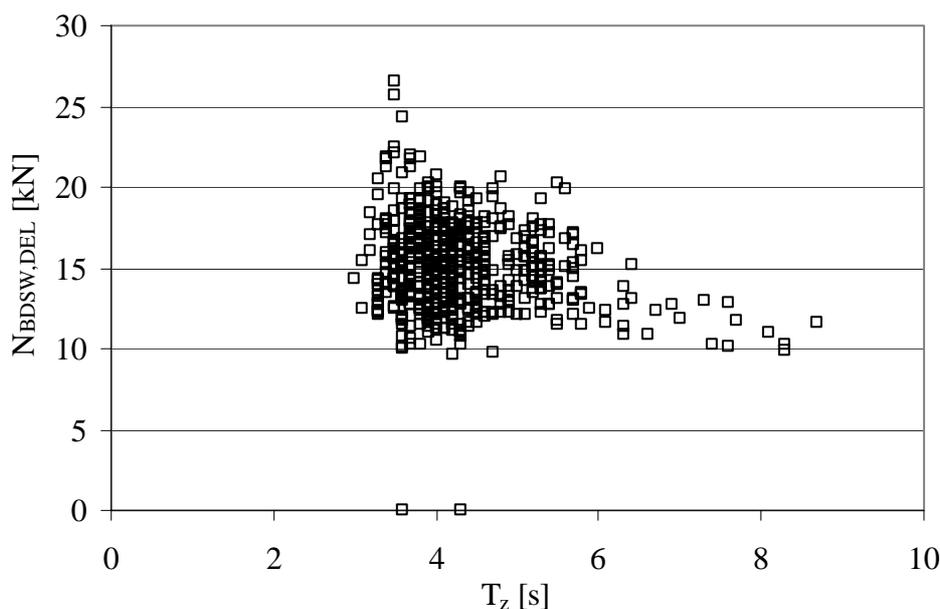


Abbildung 8: Abhängigkeit der schädigungsäquivalenten Normalkraft $N_{BDSW,DEL}$ von der Nulldurchgangsperiode T_z für $0.9m < H_s < 1.1m$.

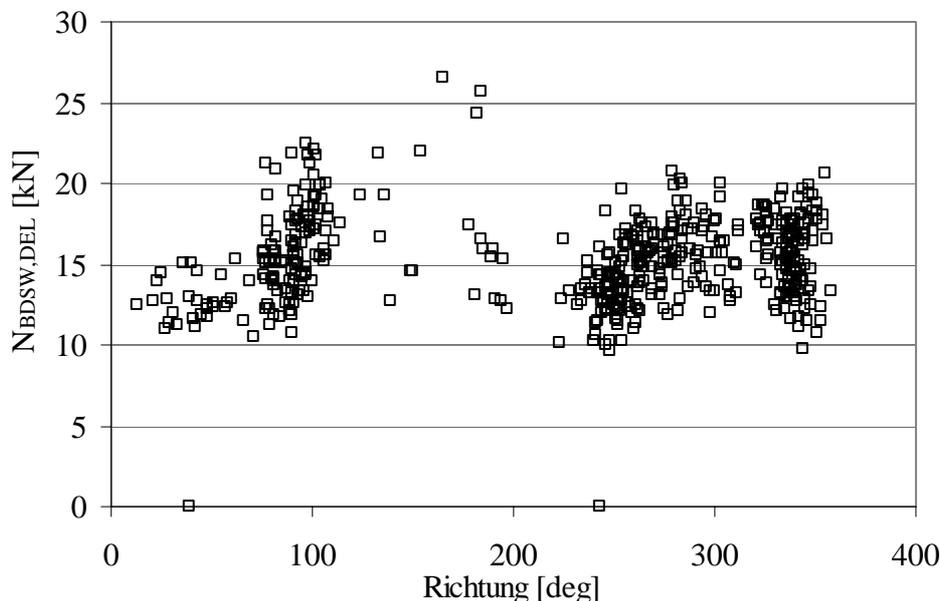


Abbildung 9: Abhängigkeit der schädigungsäquivalenten Normalkraft $N_{BDSW,DEL}$ von der mittleren Wellenrichtung für $0.9m < H_s < 1.1m$ und $3s < T_z < 5s$.

Daraus ist eine Tendenz zu entnehmen, wonach Seegangszustände mit niedrigerer Nulldurchgangsperiode, also mit kürzeren Wellen, größere schädigungsäquivalente Lasten erzeugen als solche mit längeren Wellen. Dies ist zum einen auf die veränderte Wellensteilheit zurückzuführen, zum anderen auf die Tatsache, dass in einem konstanten Vergleichszeitraum mehr kürzere Wellen auftreten und dadurch eine größere Schwingspielzahl in die Auswertung eingeht. Im Bereich von drei bis fünf Sekunden ist die Streuung zwar groß, jedoch ist ein nahezu konstanter Mittelwert zu erkennen. In Abbildung 9 sind die $N_{BDSW,DEL}$ für Seegangszustände in eben diesem Bereich über der mittleren Richtung dieser Seegangszustände dargestellt. Eine Richtungsabhängigkeit ist hier nicht eindeutig herauszulesen. Dies überrascht zunächst ein wenig, da gemäß den Ausführungen in [16] zu erwarten gewesen wäre, dass speziell die Normalkraft in der Diagonalstrebe stark richtungsabhängig ist.

Es ist zu untersuchen, ob sich dieses Ergebnis für weitere Seegangszustände bestätigen lässt. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie bei einer numerischen Simulation der Einfluss der Seegangsrichtung zu bewerten ist. Dazu werden im Folgenden vergleichende Berechnungen angestellt.

3 Numerisches Modell der FINO-Plattform

Für die numerischen Simulationsrechnungen wurde die Software *HanOff* verwendet. Diese Berechnungsumgebung wurde im Rahmen des GIGAWIND-Projektes entwickelt und bereits mehrfach vorgestellt, vgl. z.B. [11], [16]. Bei dem verwendeten Strukturmodell handelt es sich um dasselbe Modell, das schon in [16] vorgestellt wurde. Die FINO-Plattform wurde in



einem Finite-Element-Modell mit Balkenelementen abgebildet. Messmast, Plattform- und Helikopterdeck wurden hier jedoch vereinfachend durch Einzelmassen idealisiert. Die das Plattformdeck darstellenden Einzelmassen wurden zudem in der Ebene des Decks horizontal gekoppelt. Das verwendete Modell ist in Abbildung 10 dargestellt.

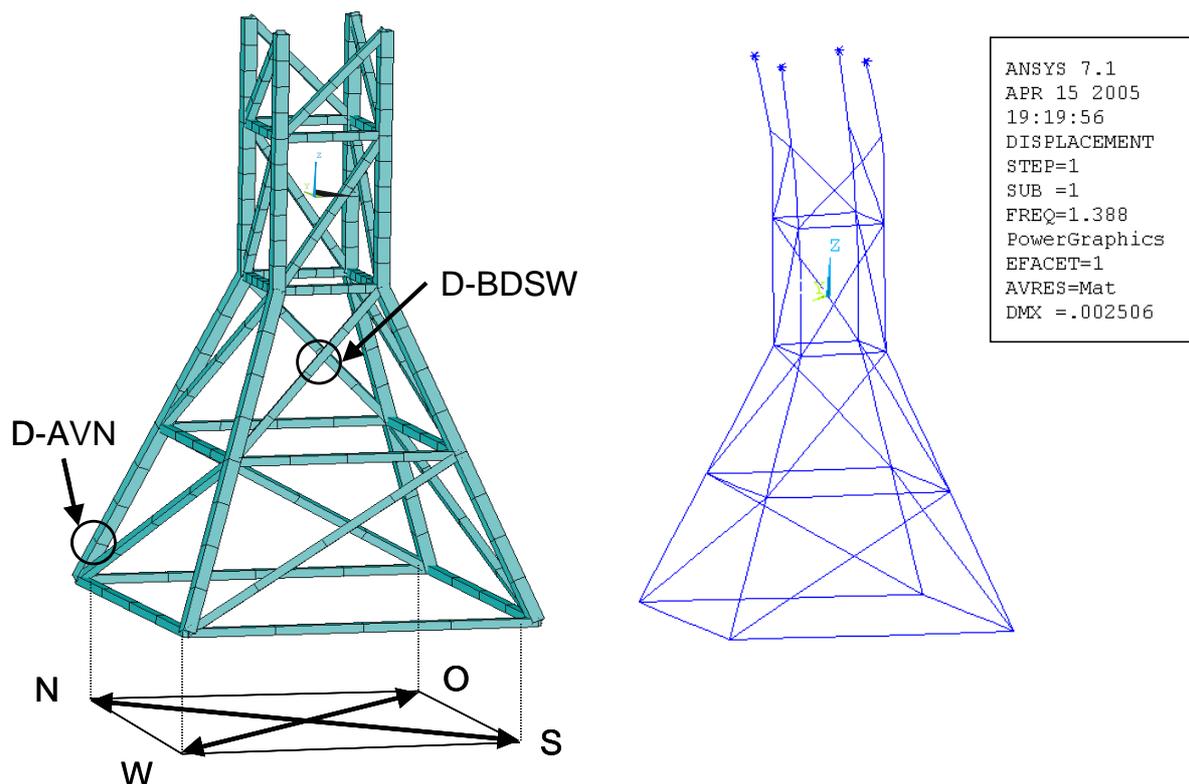


Abbildung 10: Verwendetes FE-Modell (ANSYS®) (links); erste Eigenform des Modells mit Angabe der Eigenfrequenz (rechts)

Für den Vergleich von Messung und Simulation werden Berechnungen im Zeitbereich durchgeführt. Um dynamische Anteile der Strukturantwort möglichst genau wiedergeben zu können, ist es notwendig, dass die dynamischen Struktureigenschaften ausreichend genau abgebildet werden. Hier ist insbesondere die erste Eigenfrequenz des Gesamtsystems von Interesse. Diese kann mit einer Modalanalyse des verwendeten FE-Modells zu $f_0 = 1.388$ Hz bestimmt werden. Der Frequenzgang der Spannungen infolge Normalkraft an der Messstelle D-AVN (Hauptrohr Nord) in der folgenden Abbildung 11 zeigt einen ausgeprägten Peak bei dieser Frequenz und bestätigt somit das Ergebnis der numerischen Berechnung.

Weitere Ausführungen zu dem verwendeten Modell sowie zur Durchführung der Simulationsrechnungen im Zeitbereich finden sich in [16].

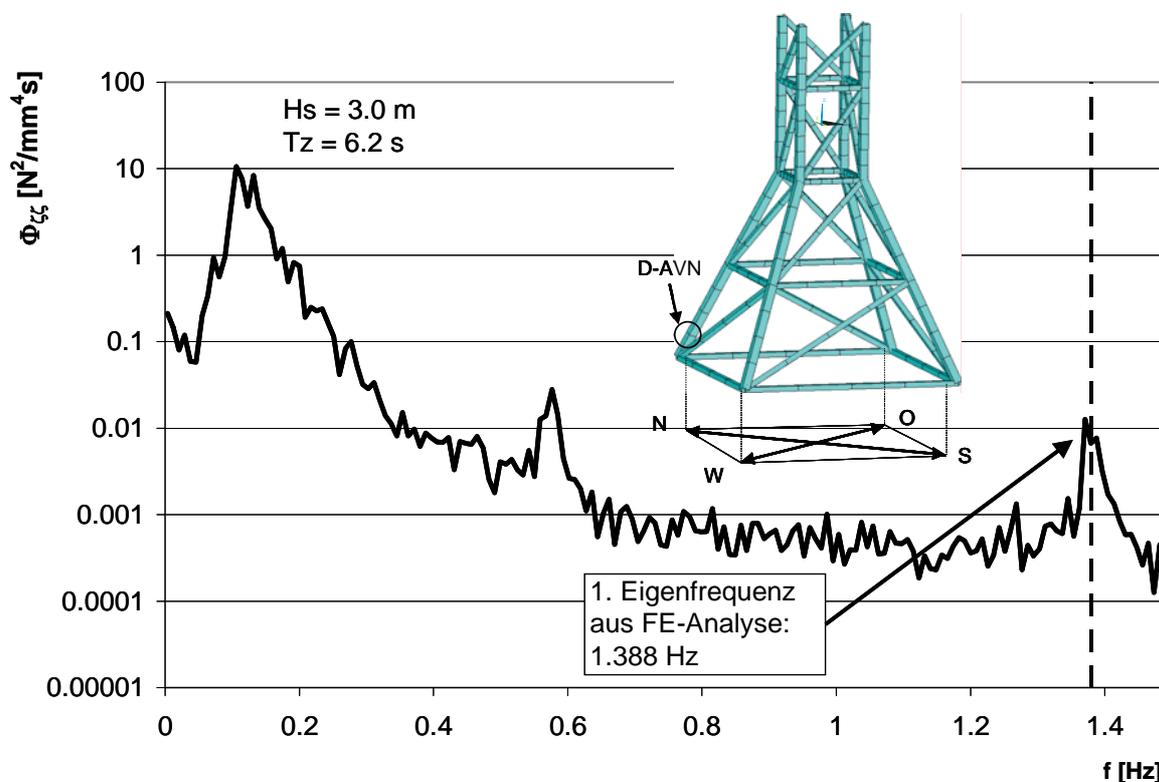


Abbildung 11: Frequenzgang der Spannungen infolge Normalkraft am Detail D-AVN (Hauptrohr Nord). Eingetragen die erste Eigenfrequenz aus der FE-Berechnung

4 Vergleichende Betrachtungen

In [16] wurden bereits Vergleichsrechnungen anhand von schädigungsäquivalenten Lasten vorgestellt. Dort wurden für verschiedene signifikante Wellenhöhen die gemessenen schädigungsäquivalenten globalen Momente den Berechnungen gegenübergestellt. Dabei konnte jedoch nur eine kleine Anzahl von Messintervallen berücksichtigt werden.

Die oben vorgestellte Auswertung aller in der Datenbank vorhandenen 10-Minuten-Intervalle für das Detail BDSW und das globale Moment ermöglicht nun einige genauere Betrachtungen.

Für die hier durchgeführten Vergleichsrechnungen wurden zwei Seegangszustände ausgewählt, für die relativ viele 10-Minuten-Intervalle zur Verfügung stehen. Der erste Seegangszustand (SZ 1) hat eine signifikante Wellenhöhe von $H_{s,1}=1.0\text{m}$ sowie eine zugehörige Nulldurchgangsperiode von $T_{z,1}=4.0 \text{ s}$. Für den zweiten Seegangszustand (SZ 2) ist $H_{s,2}=3.0\text{m}$ und $T_{z,2}=6\text{s}$.

Um eine Aussage über die Abhängigkeit der betrachteten Strukturantworten von der Richtung des Seegangs treffen zu können, wurden zwei Richtungen näher betrachtet, nämlich 225° (Wellen aus Richtung SW) und 315° (Richtung NW). Somit liegt die Hauptwellenrichtung einmal parallel zu der Diagonalstrebe, auf der sich das Detail BDSW befindet, und einmal



exakt senkrecht dazu. Den Ausführungen aus [16] folgend wäre also zu erwarten, dass für Seegangszustände, bei denen die Wellen aus Südwest auf die Struktur laufen, geringere schädigungsäquivalente Normalkräfte am Detail BDSW auftreten als aus Richtung Nordwest. Auf die globalen Momente sollte die Richtung jedoch keinen Einfluss haben.

Globale Momente

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die globalen Momente zusammengestellt. Dafür wurden mit dem oben vorgestellten Strukturmodell pro Seegangszustand und Richtung jeweils fünf Zeitreihen von je 600 Sekunden Dauer berechnet und ausgewertet. Die Beiwerte der Morison-Gleichung für die Ermittlung der Wellenkräfte auf die Struktur wurden zunächst zu $C_D=0.7$ und $C_M=2.0$ angenommen. Die Auswertung der Zeitreihe der globalen Momente erfolgte dann mit dem Rainflow-Verfahren. Die schädigungsäquivalenten Lasten wurden wie oben bereits beschrieben mit einer bezogenen Schwingspielzahl $n_{\text{äqv}}=2 \cdot 10^8$ und einer konstanten Wöhlerliniensteigung $m=4$ ermittelt.

Für beide Seegangszustände werden für beide Richtungen fast identische Werte ermittelt. Insofern entsprechen die Berechnungen den Erwartungen.

Richtung [deg]	Simulation					Standard-			
	1	2	3	4	5	Mittelwert μ [kNm]	abweichung σ [kNm]	σ/μ [%]	
SZ 1	225	1235	1198	1162	1177	1200	1194	27.3	2.3%
	315	1227	1205	1197	1235	1220	1217	15.5	1.3%
SZ 2	225	3465	3206	2940	3453	2934	3200	261.0	8.2%
	315	3246	3176	3521	3130	2950	3205	208.1	6.5%

Tabelle 1: Auswertung der Simulationsrechnungen für das schädigungsäquivalente globale Moment $M_{\text{glob,DEL}}$

Tabelle 2 enthält die Ergebnisse der Messungen. Für jeden Seegangszustand und jede Richtung sind hier jeweils die Anzahl der 10-Minuten-Intervalle, die ausgewertet werden konnten, sowie Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient des schädigungsäquivalenten globalen Moments aufgeführt. Die Simulation ist zwar stets konservativ gegenüber der Messung, die Streuungen in den Messungen sind jedoch im Vergleich zu denen der Simulation recht groß, so dass der Vergleich von Messung und Simulation insgesamt eine gute Übereinstimmung ergibt.



Seegangszustand	Richtung [deg]	Anzahl Intervalle [-]	$M_{\text{glob,DEL}}$		
			Mittelwert μ [kNm]	Standard- abweichung σ [kNm]	σ/μ [%]
SZ 1	225	32	1049	287	27.4%
	315	33	932	218	23.4%
SZ 2	225	8	3055	440	14.4%
	315	10	2683	378	14.1%

Tabelle 2: Auswertung des gemessenen schädigungsäquivalenten globalen Moments $M_{\text{glob,DEL}}$ für die untersuchten Seegangszustände und Richtungen

Normalkräfte in der Diagonalstrebe

Die gleiche Auswertung, wie oben für die globalen Momente beschrieben, wird auch für die Normalkräfte in der Diagonalstrebe am Detail BDSW durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 bzw. Tabelle 4 zusammengestellt.

Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse fällt zuerst die starke Abhängigkeit der schädigungsäquivalenten Normalkraft von der Beanspruchungsrichtung ins Auge. Für die Beanspruchungen aus Südwesten (225°) ergibt die Simulationsrechnung sehr viel kleinere Werte als für Seegang aus Nordwest (315°). Diese Abhängigkeit ist in beiden Seegangszuständen gleichermaßen zu erkennen und steht damit im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Beobachtungen. Auch die Messergebnisse in Tabelle 4 legen nahe, dass zwar eine leichte Abhängigkeit von der Seegangsrichtung zu erkennen ist, jedoch keinesfalls in der Größenordnung wie in der Simulation. Dahingegen stimmen die Ergebnisse für die Nordwest-Richtung recht gut überein. Zwar ergibt hier die Simulation offensichtlich konservative Werte, diese liegen jedoch viel dichter an den Messergebnissen als für die Südwest-Richtung.

Richtung [deg]	Simulation					Standard-		
	1	2	3	4	5	Mittelwert μ [kN]	abweichung σ [kN]	σ/μ [%]
SZ 1	225	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	0.0	2.1%
	315	22.1	21.1	21.9	22.8	22.4	0.6	2.7%
SZ 2	225	3.8	3.8	3.5	3.8	3.5	0.2	4.3%
	315	48.1	50.7	51.0	50.5	50.9	1.2	2.4%

Tabelle 3: Auswertung der Simulationsrechnungen für die schädigungsäquivalente Normalkraft $N_{\text{BDSW,DEL}}$



Seegangszustand	Richtung [deg]	Anzahl Intervalle [-]	$N_{BDSW,DEL}$		
			Mittelwert μ [kN]	Standardabweichung σ [kN]	σ/μ [%]
SZ 1	225	38	14.0	2.8	19.9%
	315	37	15.8	2.8	17.5%
SZ 2	225	8	35.4	5.0	14.0%
	315	34	46.8	4.9	10.6%

Tabelle 4: Auswertung der gemessenen schädigungsäquivalenten Normalkraft $N_{BDSW,DEL}$ für die untersuchten Seegangszustände und Richtungen.

Bewertung und Ausblick

Im statischen System der FINO-Plattform hängt die Normalkraft in der Diagonalstrebe ganz wesentlich von der Beanspruchungsrichtung ab. Liegt diese parallel zur Ebene der Strebe, so wird die Strebe direkt beansprucht und erhält so eine größere Last, als wenn die Beanspruchung senkrecht dazu verläuft. In diesem Fall resultieren die Beanspruchungen in der Strebe aus Zwangsbeanspruchungen, die von der statisch unbestimmten Einspannung der Strebe in das Gesamtsystem herrühren, sowie aus der direkten Belastung der Strebe aus dem Seegang. Diese aus der Anschauung gewonnene Einschätzung wurde in [16] anhand einer Einzelwelle aus verschiedenen Richtungen demonstriert.

Den Simulationsrechnungen im Zeitbereich liegt die Annahme zugrunde, dass der simulierte Seegang unendlich lange Wellenkämme besitzt, die sich alle in einer Richtung fortbewegen. Dadurch kommt es auch bei der Simulation unregelmäßiger Seegangszustände zu der beschriebenen Richtungsabhängigkeit der Beanspruchungen in der Diagonalstrebe oder allgemeiner der Strukturbeanspruchungen.

Diese strenge Richtungsabhängigkeit konnte durch die Messungen nicht nachgewiesen werden. Es konnte lediglich eine leichte Tendenz beobachtet werden. Für den Vergleich wurden Zeitbereiche ausgewählt, für die die bekannten Parameter in möglichst engen Schranken lagen. Diese Parameter waren die signifikante Wellenhöhe, die Nulldurchgangsperiode sowie die mittlere Wellenrichtung im jeweiligen Kurzzeitseegangszustand. Es ergeben sich gute Übereinstimmungen beim Vergleich der globalen Momente sowie für Beanspruchungen aus nordwestlicher Richtung. Daher ist ein grundsätzlicher Fehler bei dem verwendeten Berechnungsverfahren auszuschließen.

Es wird vermutet, dass die Diskrepanz zwischen Messung und Simulation für die schädigungsäquivalente Normalkraft in der Diagonalstrebe bei Beanspruchung aus südwestlicher Richtung von der Streuung der Richtungen in einem Kurzzeitseegangszustand, dem so genannten Wave-Spreading, herrührt. Im Gegensatz zu der Annahme in der Seegangssimulation weisen reale Wellen keine unendlich langen Kämme auf, vielmehr setzt sich ein realer Seegangszustand aus der Überlagerung vieler Wellen unterschiedlicher Richtung, Amplitude und Frequenz zusammen [5].



Der Einfluss der Richtungsverteilung innerhalb eines Kurzzeitseegangszustands soll im nächsten Abschnitt des Projektes anhand von vereinfachten Ingenieurmodellen sowie durch Verwendung eines richtungsabhängigen Wellenenergiespektrums für die Simulation des unregelmäßigen Seegangs untersucht werden. Dabei ist insbesondere von Interesse, ob die Berücksichtigung dieser Richtungsverteilung zu einer Herabsetzung der zu erwartenden Lebensdauer führen könnte.

5 Zusammenfassung

An der Forschungsplattform FINO 1 werden neben Wind- und Seegangsdaten auch Strukturbeanspruchungen mittels Dehnungsmessstreifen gemessen. Es wurde eine Datenbank entwickelt, in der diese Daten über einen Zeitindex einander zugeordnet werden können. Gleichzeitig wurden entsprechende Werkzeuge entwickelt, die aus den in der Datenbank vorliegenden Rohdaten Spannungen und Schnittkräfte ermitteln. Damit ist es möglich, aus der mittlerweile recht umfangreichen Datenbasis die für Vergleichsrechnungen und Parameterstudien relevanten Daten herauszuziehen.

Die Berechnungskonzepte für Lebensdaueranalysen von Offshore-Tragstrukturen erfordern die numerische Simulation der Seegangsbeanspruchung. Sowohl bei dem deterministischen Verfahren mit Einzelwellen als auch bei der Methode im Zeitbereich, bei der ein unregelmäßiger Seegangszustand durch die Überlagerung vieler verschiedener Einzelwellen simuliert wird, wird davon ausgegangen, dass der Seegang unidirektional ist, d.h. die Wellen haben unendlich lange Wellenkämme. Bei der Berechnung von vergleichsweise einfachen Strukturen wie dem Monopile hat diese Annahme nur eine untergeordnete Bedeutung, da die Strukturbeanspruchungen nicht von der Richtung abhängen. Im Gegensatz dazu konnte für das Beispiel der FINO-Plattform gezeigt werden, dass der Einfluss der Richtungsverteilung innerhalb eines Kurzzeitseegangszustands signifikant sein kann. Durch die bisher zur Anwendung gebrachten Berechnungsmethoden kann dieser Einfluss noch nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Von genaueren Untersuchungen des Einflusses der Richtungsverteilung innerhalb der Kurzzeitseegangszustände werden Aufschlüsse darüber erwartet, ob es notwendig ist, diese in den Nachweiskonzepten zu berücksichtigen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] API [Hrsg.]: *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design, RP 2A-WSD*. American Petroleum Institute, Washington D.C., USA, 2000.
- [2] Argyriadis, K. et al.: *Forschungsplattform FINO1 – einige Messergebnisse*. Tagungsband zur 4. Tagung Offshore WindEnergie. Hamburg, Juni 2005.
- [3] DNV-OS-J101: *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. Det Norske Veritas Offshore Standard. June 2004
- [4] GL Wind: *Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines*. Germanischer Lloyd WindEnergie, Hamburg, 2004.



-
- [5] Hapel, K.-H.: *Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter Offshore-Konstruktionen*. Braunschweig: Vieweg 1990.
 - [6] IMS: *Ausführungsstatik FINO 1*, IMS Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg, 2002
 - [7] Kleineidam, P.: *Zur Bemessung der Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen gegen Ermüdung*. Dissertation, Universität Hannover, 2005.
 - [8] Neumann, T.; Nolopp, K., Herklotz, K.: *Erste Betriebserfahrungen mit der FINO1-Forschungsplattform in der Nordsee*. DEWI-Magazin Nr. 24, Februar 2004
 - [9] Schaumann, P., Böker, C., Kleineidam, P.: *Development and Evaluation of Different Fatigue Design Methods for OWECs under Wave Loading*. EWEC 2003 – European Wind Energy Conference, Madrid 16.-19. June 2003
 - [10] Schaumann, P.; Böker, C.; Wilke, F.: *Lebensdaueranalyse komplexer Tragstrukturen unter Seegangsbeanspruchung*. Stahlbau 74, Beuth-Verlag, Berlin, 06/2005, S. 406-411
 - [11] Schaumann, P.; Illig, C.; Kleineidam, P.; Reiche, S.: *Lebensdaueranalysen von Offshore-Tragstrukturen für Entwurfs- und Ausführungsplanung*. 3. Symposium Offshore-Windenergie, Hannover, 2004.
 - [12] Schaumann, P.; Kleineidam, P.: *Efficient Fatigue Design for Tripod Structures in North and Baltic Seas*, 7th German Wind Energy Conference DEWEK, Wilhelmshaven, 2004
 - [13] Schaumann, P.; Kleineidam, P.; Marten, F.: *Fatigue design of support structures of Offshore Wind Energy Converters*, Nordic steel conference 2004, Copenhagen, 2004.
 - [14] Schaumann, P.; Kleineidam, P.; Wilke, F.: *Fatigue Design bei Offshore-Windenergieanlagen*, Stahlbau 73, S. 716-726, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2004.
 - [15] Schüttendiebel, R.: *Untersuchungen zu stochastischen Seegangsbeanspruchungen im Vergleich zu Messungen an der Plattform FINO 1*. Diplomarbeit, Inst. für Stahlbau, Universität Hannover, 2004.
 - [16] Zielke, W. (Hrsg.): Jahresbericht zum Forschungsprojekt „Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO1 und FINO2“, Kurztitel „GIGAWINDplus“, Förderkennzeichen 0329944. April 2005.