

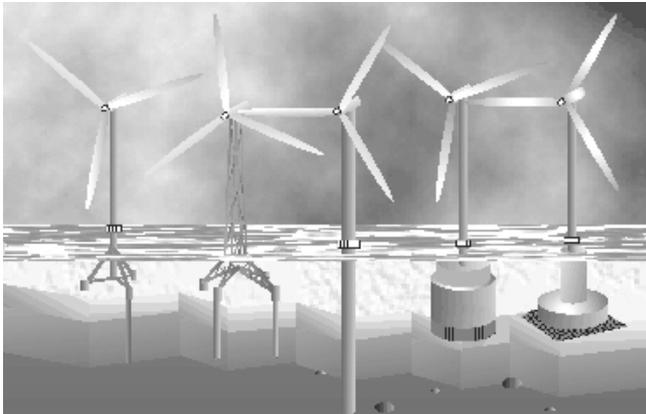
# Lasten, Gründungs- und Tragstrukturen für Offshore Windenergieanlagen in großen Wassertiefen - Forschungsvorhaben GIGAWIND (Uni Hannover)

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann, Institut für Stahlbau, Universität Hannover

*A summary is presented of the research activities within the BMU-research project **Structure, Design and Environmental Aspects of Offshore Wind-Energy-Converters**. The general purpose of the project was to develop and improve methods and tools for design and construction of offshore wind-energy-turbines in order to optimise the design and thus reduce the construction and operation costs. A better understanding of the life cycle of these offshore constructions is necessary to estimate their service life. This report is focussed on wave loads and design of support structures and foundations for offshore wind energy converters. The special conditions due to the situation in the German North and Baltic Sea have been taken into account. These conditions concern particularly power rates up to 5 MW and great water depths from 20 to 50 m. Detailed information about the project as well as a number of publications are available at [www.GIGAWIND.de](http://www.GIGAWIND.de).*

In diesem Beitrag wird über das BMU-Forschungsvorhaben Bau- und umwelttechnische Aspekte von Offshore Windenergieanlagen berichtet, das von Ende 2000 bis Ende 2003 an der Universität Hannover durchgeführt wurde. Das Projekt wurde beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie beantragt und bewilligt und lief ab 2003 unter dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Die Projekträgerschaft hatte das PTJ, Forschungszentrum Jülich GmbH, inne. Folgende vier Institute waren an dem Forschungsvorhaben beteiligt:

- Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen
- Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall- und Messtechnik
- Institut für Stahlbau
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau



Konzepte für Tragstrukturen

Die Forschungsaktivitäten des Curt-Risch-Institutes werden hier nicht behandelt, weil darüber in einem gesonderten Beitrag im Themenblock „Umweltauswirkungen“ berichtet wird. Daher handelt dieser Beitrag schwerpunktmäßig von den bautechnischen Aspekten von Offshore-Windenergieanlagen. Die Einzelthemen des Forschungsvorhabens können überwiegend den beteiligten Instituten zugeordnet werden, obwohl zwischen den Aktivitäten der Institute starke Interaktionen bestehen. In diesem Beitrag werden die wichtigsten Forschungsergebnisse herausgestellt.

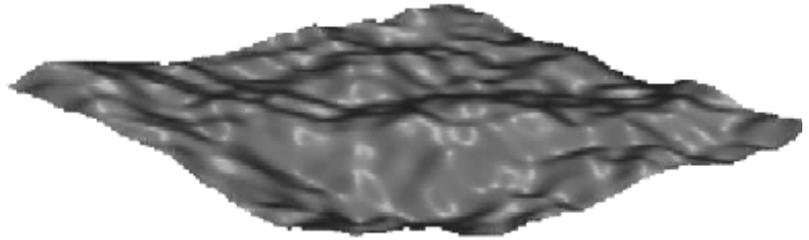
## Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen

### **Seegangsklima und Seegangssimulation**

Im Rahmen des Projektes wurde mittels einer Verkettung verschiedener Modelle Seegangssimulationen für die Deutschen Bucht durchgeführt. Der untersuchte Zeitraum umfasst die Jahre 1989 bis 2000. Die simulierten statistischen Seegangparameter und mittleren Windgeschwindigkeiten liegen mit einer räumlichen Auflösung von ca. 1 km für alle drei Stunden vor. Eine Auswertung der Daten ermöglichte eine Charakterisierung des lokalen Seegangsklimas und eine Beschreibung der (Dauer-)Belastungen auf die OWEA infolge Seegangs. Die statistische Auswertung der Seegangssimulation in Hinblick auf extreme Ereignisse lieferte standortabhängig die „Design“-Wellenhöhe mit definierter Wiederkehrperiode.

### **Wellen- und Seegangslasten**

Für die Ermittlung der Wellen- und Seegangslasten auf Windenergieanlagen wurde das Programm WaveLoads entwickelt, welches für beliebige hydrodynamisch transparente Strukturen (z.B. Jackets) die Lasten berechnet. Für die Berechnung der Wellenkinematik stellt die Software lineare und nichtlineare Wellentheorien zur Verfügung. Eine stochastische Seegangssimulation basierend auf dem Superpositionsmodell des Seegangs kann ausgehend von gemessenen oder parametrisierten Richtungsspektren durchgeführt werden. Eine grafische Benutzeroberfläche soll zu einer verbesserten Bedienbarkeit beitragen.



Richtungsfunktion der Seegangbelastung  
(hier nach Cosine-Powell)

### **Beeinflussung der großräumigen Meeresströmung**

Einen weiteren Aspekt stellte die Frage nach möglichen Auswirkungen von Offshore-Windparks auf die großräumige Meeresströmung und ggf. deren quantitativer Erfassung mittels hydrodynamisch-numerischer Strömungsmodelle dar. Untersuchungen an drei ausgesuchten Standorten (Borkum Riff, Helgoland und UFS Elbe im Bereich der Wesermündung) innerhalb der Deutschen Bucht haben gezeigt, dass es bei der angestrebten Endausbauphase der Windparks nur zu einer geringfügigen Beeinflussung von wenigen Prozent der großräumigen Meeresströmung kommt.

### Institut für Stahlbau

### **Beanspruchungen – Berechnungskonzepte**

Für den Nachweis der stählernen Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen gegen Ermüdung wurden sowohl deterministische Bemessungskonzepte als auch Simulationsrechnungen im Zeitbereich und Berechnungen im Frequenzbereich umgesetzt und vergleichend bewertet. Die langzeitstatistische Datenbasis der Seegangsbedingungen ist dafür teils vom Institut für Strömungsmechanik mittels Simulationsrechnungen ermittelt worden. Das deterministische Nachweiskonzept führt in bestimmten Fällen zu einer schnellen und realistischen Einschätzung der Strukturschädigung. Maßgebendes Kriterium ist dafür eine geringe Wellenhäufigkeit im Resonanzbereich der Struktur. Die daraus abzuleitenden Grenzwerte für die Eigenfrequenzen sind dabei vom betrachteten Seegebiet abhängig und können sich zwischen Nord- und Ostsee deutlich unterscheiden. Ist das Kriterium erfüllt, so ist das deterministische Verfahren wegen des geringsten numerischen Aufwandes auch für Ausführungsplanungen zu empfehlen. Steigt der Anteil der Wellen im Resonanzbereich an, so sollte das deterministische Konzept auf Entwurfsberechnungen beschränkt bleiben. Liegt dagegen eine große Zahl der zu erwartenden Wellen im Resonanzbereich der Struktur, so sollten auch im Entwurfsbereich aufwändigere dynamische Berechnungen durchgeführt werden. Um die Anzahl der erforderlichen Simulationen und den damit verbundenen numerischen Aufwand zu begrenzen, empfiehlt sich die Verwendung der Untersuchungen im Frequenzbereich mit numerisch ermittelten Transferfunktionen, da sie die statistischen Eigenschaften des Seegangs besser mit den dynamischen Struktureigenschaften verknüpft. In diesen Fällen sollten für Ausführungsplanungen dynamische Berechnungen im Zeitbereich für eine ausreichende Anzahl von Seegangszuständen durchgeführt werden.

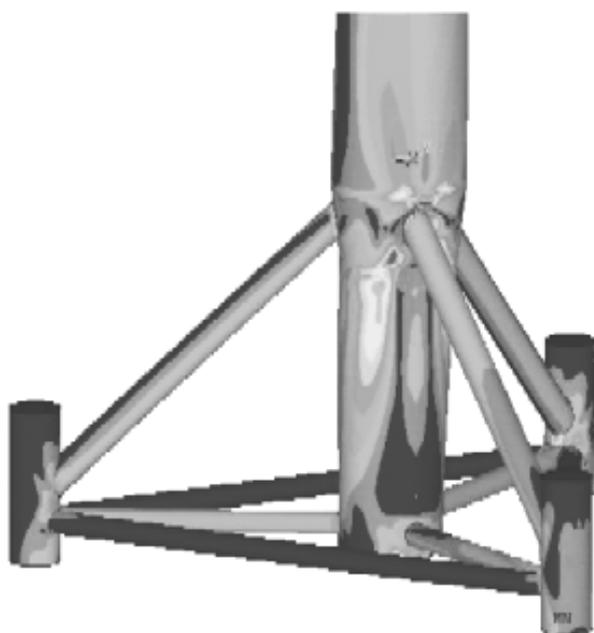
### **Design Tool „HanOff“**

Zur Anwendung der beschriebenen Verfahren wurde das Offshore-Berechnungsprogramm Han-Off entwickelt. Mit dem Programm können beliebige hydrodynamisch transparente Strukturen unter Seegangsbeanspruchungen statisch und dynamisch berechnet werden. Für

die Bestimmung der Strukturantwort unter den Beanspruchungen wird das kommerzielle FE-Programm ANSYS© verwendet. Im Rahmen des Postprocessings können Rohrknotenverbindungen mit dem Strukturspannungskonzept nach Efthymiou (1988) bewertet werden, sowie Schädigungsberechnungen im Zeitbereich mit der Rainflow-Methode bzw. im Frequenzbereich nach Durchführung einer FFT bewertet werden. Zur Ermittlung der anzusetzenden Wellenlasten existiert eine Schnittstelle zu dem Programm WaveLoads, das am Institut für Strömungsmechanik entstanden ist. Parallel dazu sind auch eigene Programmentwicklungen im Bereich der Wellenlasten implementiert worden.

### Konstruktive Details

Es wurden Untersuchungen zu „Grouted Joints“ bei Monopiles (Schalenbeulen) und zur Traglast und Ermüdungsfestigkeit von Tripodkonstruktionen durchgeführt. Die Tragfähigkeiten von stählernen Rohrknoten lassen sich in ebenen Anschlüssen mit Hilfe der Bemessungsregeln nach den unterschiedlichen Vorschriften gut bestimmen. Der Parameterbereich für diese empirischen Ansätze ist begrenzt, da sie auf Versuchen beruhen. Mit einem anhand von Versuchsergebnissen validierten FE-Modell wurden Tragfähigkeiten für ebene Knoten bestimmt, die den zulässigen Parameterbereich verlassen. Im untersuchten Bereich liefern die empirischen Formeln konservative Tragfähigkeiten.



Strukturspannungen am Tripod

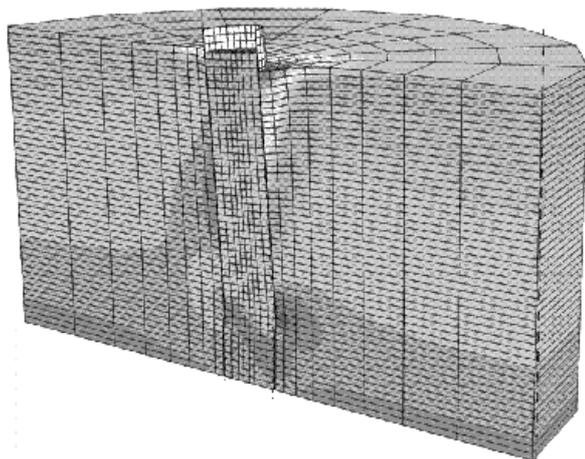
An dem FE-Modell einer Tripod-Gründung wurden die Auswirkungen der speziellen räumlichen Beanspruchungsverhältnisse untersucht. Bei Annahme eines Y-Anschlusses konnte die Tragfähigkeit des Knotens im untersuchten Bereich gut vorausgesagt werden. Zusätzlich wurden numerische Untersuchungen an Rohrknoten, wie sie für Tripod-Strukturen erwartet werden, in Bezug auf Tragfähigkeit und Ermüdungsverhalten durchgeführt. Dabei konnten z.B. für die Tragfähigkeitsuntersuchungen die Anwendung empirischer Gleichungen auch außerhalb des ursprünglichen Anwendungsbereiches bestätigt werden. Weiterhin konnte in einem bewertenden Vergleich der Spannungskonzentrationsfaktoren (Stress Concentration Factors = SCF) von Rohrknoten bei Tripods festgestellt werden, dass die Ermittlung von Strukturspannungen mit parametrisierten Formeln als gute Grundlage für Entwurfsrechnungen verwendet werden kann.

### Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Vorhandener **Daten zu den Baugrundbedingungen in der Nordsee** wurden ausgewertet und zusammen mit einem **State of the Art zur Gründung von Offshore-Windenergieanlagen** veröffentlicht. Darin enthalten ist außer einer Zusammenstellung der aus verschiedenen Quellen entnommenen Informationen über die geologische Entstehung und die bodenmechanischen Eigenschaften der Bodenarten einen Überblick über die geophysikalischen und geotechnischen Untersuchungsverfahren. Ein Mindestumfang dieser Untersuchungen für die Vor- und Ausführungsplanung von Offshore- Windenergieanlagen wird definiert. Es wurde die Absicht verfolgt, den Anlagenplanern, die ja in der Regel keine Geotechniker sind, einen Einblick in die relevanten geotechnischen Aufgaben zu vermitteln und Ihnen Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Diesem Zweck dient auch das Glossar, in dem geotechnische Fachbegriffe erläutert werden. Das Buch ist in der Fachöffentlichkeit positiv aufgenommen worden, und hat insbesondere auch Eingang in die Festlegungen des BSH durch Mitwirkung in der AG Baugrunderkundungen zum Mindestumfang von Baugrunduntersuchungen gefunden.

## Vorbemessung und technische Bewertung verschiedener Gründungssysteme

Bei diesen Untersuchungen sind mit den Lastansätzen des Instituts für Strömungsmechanik verschiedene Gründungsstrukturen wie Schwergewichtsgründung, Monopile, Jacket, Tripod für charakteristische Baugrundabfolgen geotechnisch vorberechnet worden. Die statische Auslegung der Strukturen wurde vom Institut für Stahlbau vorgegeben. Die Untersuchungen dienen zur Bestimmung realistischer Gründungsabmessungen und zur Bewertung der bautechnischen Umsetzung der Strukturen. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen konnten dann die Steifigkeiten der Strukturen abgeleitet werden, was wiederum Grundlage für Schwingungsuntersuchungen, Lastermittlungen und der Bewertung von Kollisionsfolgen war. Zur Zeit werden die Vorbemessungen auf Saugnapfgründungen ausgeweitet.



FEM-Modell: Monopile im Seeboden

## Tragfähigkeit von Monopiles mit großen Durchmessern

Schwerpunkt der Arbeiten war durchgängig die Bemessung von Monopile-Gründungen. Es wurde gezeigt, dass die aus der Offshore-Praxis übernommenen konventionellen Bemessungsansätze nicht ohne Weiteres auf die erforderlichen Pfahldurchmesser und -längen übertragbar sind. Die Bemessungsansätze sind daher weiterentwickelt worden. Empfehlungen für einen verbesserten Ansatz des Pfahlwiderstands und die zutreffendere Berücksichtigung der Steifigkeit des Systems Pfahl-Boden innerhalb des Verfahrens wurden erarbeitet. Außerdem ist auf den Unterschied der Bemessung

für singuläre Extrembelastungen einerseits und der Beurteilung des Bauwerksverhaltens im Betrieb andererseits hingewiesen worden. Im Rahmen bodenmechanischen Grundsatzuntersuchungen und Berechnungen ist in verschiedenen Veröffentlichungen gezeigt worden, dass die nicht reversiblen Formänderungen des Bodens unter der wiederkehrenden Belastung durch Wellen (immerhin rd. 120 bis 150 Millionen Wellenbelastungen innerhalb von 50 Jahren) zu veränderten Bettungsbedingungen bis hin zum Verlust der Gebrauchsfähigkeit führen können. Dies war den Anlagenplanern und auch den Genehmigungsbehörden zu Beginn der Planungsvorhaben nicht bewusst. Heute bestimmt diese Frage die wissenschaftliche Diskussion. Es ist ein wesentliches Forschungsergebnis, dass dies so ist.

Ausführliche und weitergehende Informationen zum Forschungsprojekt sind in zahlreichen Veröffentlichungen enthalten, die auf der Webseite [www.GIGAWIND.de](http://www.GIGAWIND.de) zu finden sind; meist als *download*.

Besonderer Dank gilt dem BMU für die Förderung und dem Projektträger Jülich für die exzellente Betreuung des Forschungsprojektes.

Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann ([www.stahlbau.uni-hannover.de](http://www.stahlbau.uni-hannover.de))  
Institut für Stahlbau

Prof. Dr.-Ing. W. Zielke ([www.hydro-mech.uni-hannover.de](http://www.hydro-mech.uni-hannover.de))  
Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen  
beide: Universität Hannover, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

Prof. Dr.-Ing. W. Richwien ([www.uni-essen.de/grundbau](http://www.uni-essen.de/grundbau))  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau  
Universität Duisburg-Essen, Universitätstraße 15, 45117 Essen