

BAU UND UMWELTTECHNISCHE ASPEKTE VON OFFSHORE-WINDENERGIEANLAGEN

Von

W. Zielke¹
P. Schaumann²
W. Gerasch³
W. Richwien⁴
K. Mittendorf⁵
P. Kleineidam⁶
A. Uhl⁷

ABSTRACT

The German research group GIGAWIND deals with environmental and structural design aspects of offshore wind-energy converters. The aim of this research project is to develop and improve the methods and tools for the 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 life duration. Moreover, a method for quantifying the environmental effects to the surrounding must be achieved.

1. EINLEITUNG

Die Forschungsgruppe GIGAWIND beschäftigt sich zum einem mit umweltrelevanten Fragestellungen und zum anderen mit bautechnischen Aspekten von Offshore-Winergieanlagen (OWEA). Sie setzt sich aus folgenden vier Instituten zusammen:

- Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover
Koordination der Forschungsgruppe Prof. Dr.-Ing. W. Zielke

¹ Prof. Dr.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover

² Prof. Dr.-Ing., Institut für Stahlbau, Universität Hannover

³ Dipl.-Ing., Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall und Messtechnik, Universität Hannover

⁴ Prof. Dr.-Ing., Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen

⁵ Dipl.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover

⁶ Dipl.-Ing., Institut für Stahlbau, Universität Hannover

⁷ Dipl.-Ing., Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall und Messtechnik, Universität Hannover

- Institut für Stahlbau, Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann
- Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall und Messtechnik, Universität Hannover
Dipl.-Ing. W. Gerasch
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen
Prof. Dr.-Ing. W. Richwien

Im Rahmen dieses Projekts befasst sich das Institut für Strömungsmechanik mit den Strömungen, dem Wind, den Wellen sowie mit den auf die OWEA einwirkenden Kräften.

2. UMWELTRELEVANTE FRAGESTELLUNGEN BEI DER PLANUNG VON OFFSHORE-WINDPARKS

Dieser Themenkreis geht der Frage nach, ob und ggf. wie Offshore-Windparks ihre Umgebung beeinflussen können.

Es wird untersucht, ob sich durch die Errichtung von zahlreichen Offshore-Windfarmen mit bis zu mehreren Hundert Einzelanlagen die großräumigen Strömungsverhältnisse in Nord- und Ostsee verändern können.

Zu klären ist dabei, ob es im Parkbereich zu einer Verringerung der Strömung kommt und damit einhergehend eine verstärkte Sedimentation einsetzt. Eine erhöhte Turbulenz könnte zu einer Verstärkung der Trübung im Wasserkörper führen. Ob in diesem Fall mit einer größeren Schwebstoffbildung zu rechnen ist, ist noch zu klären.

Während der Bauphase wird verstärkt mit Trübungsfahnen gerechnet. Dabei sollte abgeschätzt werden, in welchem Umfang diese auftreten, wie ihr Eintrag minimiert werden kann und wo diese wieder sedimentieren. Darüber hinaus muss mit einer Kolkbildung an den OWEA gerechnet werden. Die standortspezifische Beantwortung all dieser Fragen könnte im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gefordert werden.

Der Einsatz eines hydrodynamisch-numerischen Modells der Deutschen Bucht soll dabei helfen, die Einflüsse von Windparks auf die großräumigen Strömungsverhältnisse abzuschätzen.

Erste Berechnungen mit drei repräsentativen Windfarmen (Standorte: Borkum/Riff, Wesermündung und Helgoland) in der Nordsee haben gezeigt, dass es zu einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit von wenigen Prozenten im und um den Parkbereich kommen kann.

Zur Auswertung werden zwei Systeme, eines mit und eines ohne Bebauung, mit identischen Rand- und Anfangsbedingungen gerechnet und anschließend voneinander subtrahiert. Es ergibt sich somit eine Zeitreihe der Geschwindigkeitsdifferenzen die noch statistisch auszuwerten ist (MITTENDORF et al., 2001).

Ein weiterer Aspekt, welcher besonders die Gemüter der Küsten- und Inselbewohner der Deutschen Bucht beschäftigt, ist die Frage nach der Sichtbarkeit der OWEA. Die geplanten Standorte für Offshore-Windparks haben große Bedeutung für den Tourismus, welcher für die Region die wichtigste Erwerbsquelle darstellt.

Aufgrund der Abmessung der Einzelanlage sowie Stückzahl und Ausdehnung der Windparks muss mit optischen Einwirkungen gerechnet werden unklar ist jedoch noch in welchem Umfang. Die Anlieger haben ihre Besorgnis bezüglich der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch den Bau der Offshore-Windparks geäußert.

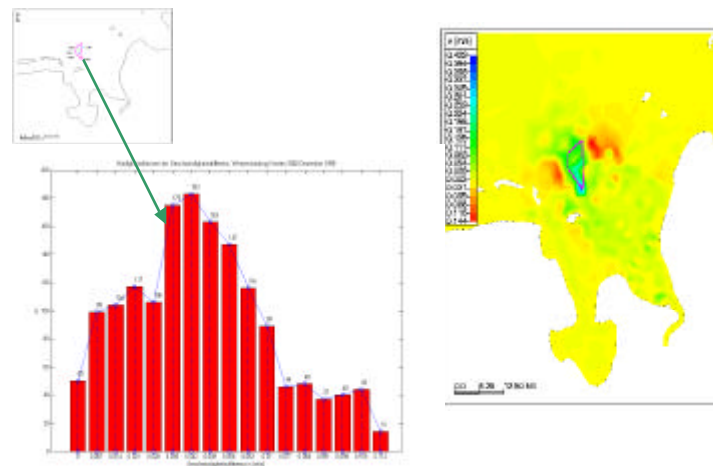


Abbildung 1 Geschwindigkeitsdifferenzen in und um einen Windpark in der Wesermündung

Der Begriff der Sichtbarkeit ist stark subjektiv belastet. Ziel in einer von Schulz und Strybny durchgeführten Sichtbarkeitsanalyse (SCHULZ, 2001) ist das Auffinden und Zusammentragen von objektiven Bewertungsmöglichkeiten für die optische Wirkung von Bauwerken im Meer.

Das Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall und Messtechnik geht zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit der Frage der Schallemission von OWEA nach. Dafür soll die zu erwartende Schallabstrahlung von der OWEA und die Schallausbreitung im Meer in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle, der Wassertiefe, der Erregung und dem Untergrund berechnet werden (GERASCH und UHL, 2001).

2. ERMITTLUNG DER BELASTUNGEN DURCH WIND UND WELLEN

Ein weiterer Themenkreis von GIGAWIND betrifft die Einwirkung von Wind, Wellen und Strömungen auf das Bauwerk in Form der wirkenden Kräfte.

Hier geht es um eine möglichst genaue Ermittlung der maximalen Belastungen bezüglich Dimension, Korrelation und Auftretswahrscheinlichkeit sowie einer naturnahen Beschreibung des Klimas während des Normalbetriebes. Dazu werden Werkzeuge als Methoden und Software entwickelt und später als *public domain software* der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht.

Die Kenntnis für den Wind über dem Meer ist zurzeit noch recht bescheiden. Es fehlen detaillierte und gesicherte Informationen über vertikale Windprofile, Böenstatistiken, Turbulenz, Wechselwirkung Wind Wellen. Noch größere Unsicherheit besteht bei der Kombination von Wind- und Wellenlasten.

Im Rahmen eines gemeinsamen Programms von BMWi und BMU sollen an vier möglichen Baugebieten kommerzieller Offshore-Windparks Messplattformen errichtet

werden. Im Zukunftsinvestitionsprogramm der Bundesregierung stehen dafür rund 30 Mio DM zur Verfügung (BMU, 2001).

3. KONSTRUKTIVE DETAILS UND GRÜNDUNGSKONZEPTE

Dem höheren Energiepotential auf dem Meer steht ein vergrößerter Aufwand für die Erstellung der Tragkonstruktionen, die Montage, die Wartung und den Netzanschluss gegenüber. Die in der Ölindustrie entwickelten Techniken und Erfahrungen können zwar zum Teil für den Bereich der Offshore-Windenergie genutzt werden, es stehen dem jedoch noch einige technische Fragestellungen gegenüber (SCHAUMANN und KLEINEIDAM, 2001).

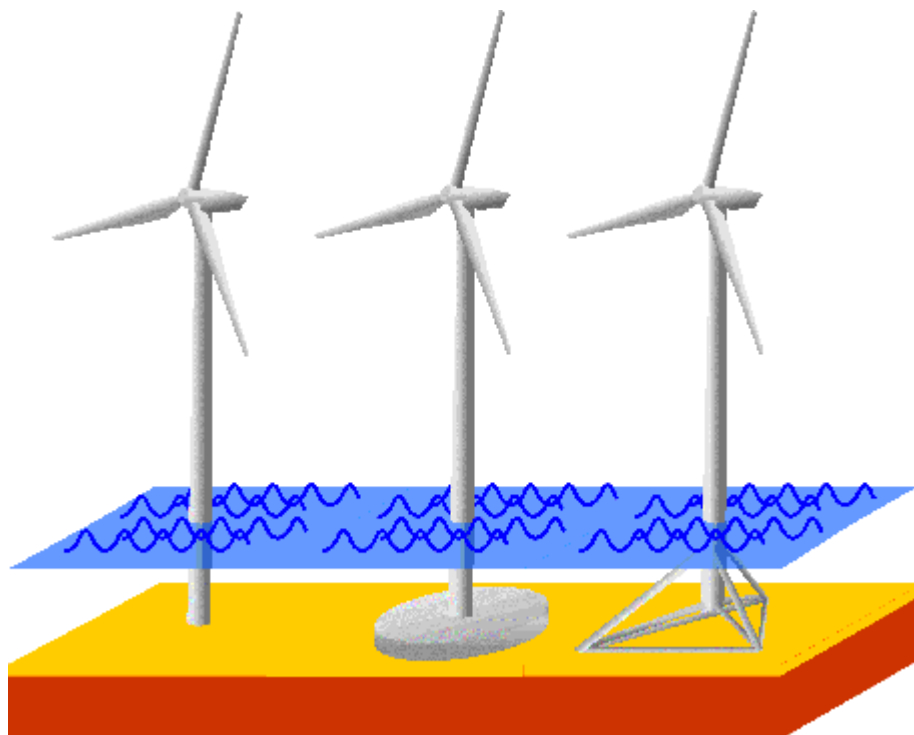


Abbildung 2 Mögliche Tragkonstruktionen für OWEA

Wie beeinflussen die besonderen Verhältnisse (Fundament, Gründung, Art der Belastung) das Schwingungsverhalten der Anlagen?

Für die Offshore-Anlagen werden die spezifischen Umgebungsbedingungen der Windbeanspruchungen und die Einflüsse aus der kombinierten Anregung aus Wind und Wellen untersucht. Das Schwingungsverhalten des Turmes ist aufgrund der hochdynamischen Beanspruchung der Windkraftanlagen bestimmend für das Ermüdungsverhalten und damit der Dauerhaftigkeit der Konstruktion.

Anhand von simulierten Beanspruchungen durch Wind, Wellen und Turmschwingungen werden Ansätze für die gegenseitige Beeinflussung der Eingangsgrößen entwickelt. Für die Validierung können gegebenenfalls Messungen an bereits ausgeführten Anlagen herangezogen werden.

**Welchen Ermüdungsbeanspruchungen sind Offshore-WEA ausgesetzt?
Wie sind die einzelnen Einflüsse aus Wellen und Betrieb zu überlagern?**

Die bei den Untersuchungen des Schwingungsverhaltens ermittelten Erkenntnisse werden auf die Ermüdungsfestigkeitsnachweise zu übertragen. Dabei werden unterschiedliche Bauformen berücksichtigt (u.a. Monopile und Tripod), um geeignete Konstruktionsmöglichkeiten in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen, wie Wassertiefe, Strömung etc. vorzuschlagen. Die Einflussfaktoren, wie angenommene Bodenkennwerte, Einstellungen der Maschinensteuerung und Eigenfrequenzen der Konstruktion, werden auf ihre Sensitivität bezüglich der Bauwerksreaktionen überprüft

Stabilität

Wie wirkt sich örtlicher Wasserdruck auf die heute entwickelten Nachweise gegen Beulen von Kreiszylinderschalen unter überwiegender Biegebeanspruchung aus?

Aufgrund der Meeresströmung ist für die unter Wasser liegenden Bereiche der Stahlkonstruktionen von über dem Umfang ungleichmäßigen Belastungen auszugehen, die sich mit den Belastungen in Schalenrichtung überlagern. Das Schalenbeulverhalten für diese Belastungen ist noch nicht in vereinfachten Nachweisen geregelt. Daher werden für typische Geometrien numerische Untersuchungen zum Beulverhalten durchgeführt, um daraus Ansätze für vereinfachte Berechnungsverfahren zu entwickeln.

Konstruktive Details

Welche Verbindungsarten sind bei Stahlkonstruktionen der Offshore-WEA anwendbar? Wie wirken sich die dynamischen Beanspruchungen auf das Fundament, insbesondere bei Pfahlgründungen aus?

Die spezifischen Montage und Umgebungsbedingungen der Offshore-Anlagen machen neue Detaillösungen erforderlich. Zum Beispiel werden für den Übergang zwischen dem relativ ungenau zu fertigen Gründungsbereich und dem präzisen Stahlurm Konstruktionsmöglichkeiten untersucht, die den in oben beschriebenen Beanspruchungen Rechnung tragen.

Welches Sicherheitskonzept ist für Offshore-WEA anzuwenden?

Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden die Unsicherheiten in den Bemessungsansätzen für Offshore-Anlagen abgeschätzt. Auf Basis eines zu erzielenden Sicherheitsniveaus werden Ansätze für die Wahl von Sicherheitsfaktoren vorgeschlagen. Diese werden im Vergleich zu den Angaben in bestehenden Richtlinien für Windenergieanlagen bewertet.

Die Gründung der Anlagen gilt mit der gegenwärtigen Technik als prinzipiell lösbar. Für eine wirtschaftliche Optimierung sind die bestehenden Erfahrungen und die in Normen enthaltenen Regeln jedoch nicht ohne weiteres anwendbar, weil sie für Bauwerke aufgestellt wurden, die sich wesentlich von den geplanten Anlagen unterscheiden. Auch die in europäischen Ländern küstennah errichteten Offshore-WEA weisen andere Standortbedingungen auf als die in Deutschland geplanten. Durch die größeren Wassertiefen (Standorte in der Nordsee: rd. 30 m) und Nabenhöhen sind die in

den Baugrund einzuleitenden Kräfte und Momente so groß, dass die bisher bei Offshore-WEA angewendeten Gründungskonzepte wirtschaftlich und technisch in Frage gestellt werden (RICHWIEN et al., 2001).

Im Rahmen des Forschungsprojektes GIGAWIND sollen für den Bereich Grundbau und Bodenmechanik die folgenden Schwerpunkte bearbeitet werden.

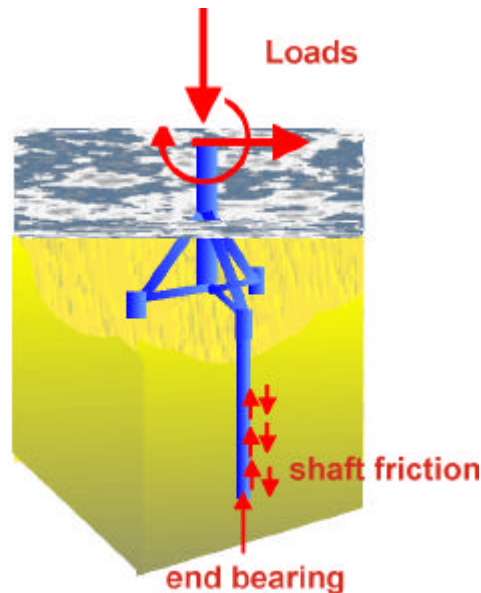


Abbildung 3 Beispiel einer Tripod-Gründung

Entwicklung von Entwurfskriterien für die Gründungsart

Für die unterschiedlichen Gründungsarten von Offshore-WEA sollen Entwurfskriterien entwickelt werden, mit denen für einen konkreten Standort die optimale Gründungsart definiert und vorbemessen werden kann. Einige mögliche Gründungskonzepte für Offshore-WEA sind in dem vorangegangenen Bild dargestellt. Bisher sind für die Erkundung des Baugrunds vorhandene geologische Kartierungen für die südliche Nordsee zusammengestellt und ausgewertet worden. . Weiteres Ziel der Arbeit ist es, spezielle Anforderungskataloge an Feld- und Laborversuche für den Entwurf von Offshore-WEA aufzustellen. Zunächst werden sich die Untersuchungen noch an den bestehenden Regeln, wie sie in einschlägigen Normen und Empfehlungen für Offshore-Bauwerke zu finden sind, orientieren müssen.

Entwurf und Bemessung der Gründung

Bei den Offshore-WEA kommt der Belastung aus Wellen eine besondere Bedeutung zu. Die daraus resultierenden Kräfte und Momente in der Gründung sind deutlich größer als diejenigen aus Wind. Das Verhalten des Bodens unter diesen Einwirkungen ist zu analysieren, wobei berücksichtigt werden muss, ob es sich um periodische oder dynamische Einwirkungen handelt. Von Interesse ist dabei insbesondere die Veränderung des Porenwasserdrucks infolge der Wellenbelastung und die damit verbundene Änderung der wirksamen Spannung im Boden. Die Veränderung des

Porenwasserdrucks ist zum Beispiel von der Wellenhöhe und der Wellenperiode abhängig.

Bisher werden in den Nachweisverfahren der Geotechnik für die Einwirkungen und Widerstände deterministische Werte angesetzt. Dadurch wird unterstellt, dass ihre Größe und im Fall der Wellen auch ihre Wirkungsrichtung im voraus definiert werden können. Die Wellenbelastung ist jedoch ein gutes Beispiel für eine stark streuende Zufallsgröße, die deterministisch nicht korrekt zu erfassen ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Ansatz solcher Einwirkungen als quasi-statische Lasten, wobei in der Regel mit den ungünstigsten Parameterkombinationen gerechnet wird, in üblichen Nachweisen zu gravierenden Überdimensionierungen führt (Lesny et al., 2000). Für die Realisierung der Offshore-Windparks ist jedoch entscheidend, dass ein sicheres aber auch kostengünstiges Konzept entwickelt werden kann. Im Forschungsprojekt soll daher ein Beitrag für die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes, das den speziellen Anforderungen an Offshore-WEA gerecht wird, erarbeitet werden. Ein Problem bei der Entwicklung eines solchen Konzeptes besteht in der zuverlässigen Auswertung von Bodenkennwerten.

Modellierung der Interaktion Einwirkungen - Bauwerk – Baugrund

Von periodisch belasteten Zugpfählen ist bekannt, dass sich mit jedem Lastzyklus die Verschiebungen akkumulieren (Wang, 2000). Die Größe der nach einer bestimmten Lastspielzahl erreichten Verformung ist dabei abhängig vom Verhältnis der Lastamplitude zur statischen Pfahltragfähigkeit. Für die unterschiedlichen Gründungen für Offshore-WEA sollen insbesondere Veränderungen der Bettungssteifigkeiten unter zyklischen Einwirkungen untersucht werden. Diese Ergebnisse sind eine Basis für die Entwicklung von Stoffgesetzen, mit denen das Verhalten des Bodens beschrieben werden kann.

4. DANKSAGUNG

Die beteiligten Institute bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des Forschungsvorhabens.

5. SCHRIFTTUM

BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMU), Positionspapier der Bundesregierung, Homepage: www.bmu.de/erneuerbare-energien, 2001.

GERASCH, W.-J., UHL, A.: Schallabstrahlung des Turmmantels von WEA, Vortrag zum Symposium „*Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte*“, Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall- und Messtechnik, Universität Hannover, 2001

MITTENDORF, K., HOYME, H. und ZIELKE, W.: Beeinflussung der Meeresströmung durch Windparks, Vortrag zum Symposium „*Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte*“, Institut für Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 2001

RICHWIEN; W., LESNY, K. und WIEMANN, J.: Gründungskonzepte für Offshore-WEA, Vortrag zum Symposium „*Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte*“, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, 2001

SCHAUMANN, P, KLEINEIDAM, P.: Entwurf und Bemessung der Tragkonstruktion von Offshore-WEA, Vortrag zum Symposium „*Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte*“, Institut für Stahlbau, Universität Hannover, 2001

SCHULZ, D.: Sichtbarkeitsanalyse von Offshore-Windparks, Studienarbeit, 2001, Institut f. Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover