

Energiegewinnung auf hoher See

SICHERHEIT UND ZUVERLÄSSIGKEIT VON OFFSHORE-WINDENERGIEANLAGEN

Die Windenergie nimmt gegenwärtig eine zentrale Rolle bei der Erzeugung regenerativer Energien ein. Damit steigt auch der Bedarf an sogenannten Offshore-Windenergieanlagen auf hoher See. Da diese anderen Beanspruchungen ausgesetzt sind als Anlagen an Land, müssen hierfür spezielle Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbestimmungen beachtet werden. Wissenschaftler der ForWind-Institute der Leibniz Universität Hannover zeigen, wie die Sicherheit von Offshore-Windenergieanlagen gewährleistet werden kann.



Derzeit sind in Deutschland über 21.200 Windenergieanlagen (WEA) mit einer elektrischen Leistung von circa 26 Gigawatt installiert [BMU]. Diese Leistung wird nahezu ausschließlich von sogenannten Onshore-Anlagen erbracht, also an Land installierten WEA. Die Bundesregierung

verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2025 den Anteil der Windenergie an der Stromerzeugung auf 25 Prozent zu steigern [BMU]. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es unumgänglich, auch Anlagen auf hoher See zu errichten, sogenannte Offshore-Windenergieanlagen (OWEA).

Für WEA an Land bestehen bereits langjährige Erfahrungen. Die Bemessung dieser Anlagen, sowohl der Tragelemente wie Turm und Fundamente als auch der elektrischen und mechanischen Anlagenteile, konnte in den letzten Jahren kontinuierlich angepasst und optimiert werden. Für OWEA hingegen bestehen diese Erfahrungen nur in sehr eingeschränkter Form, da auf hoher See andere Umgebungsbedingungen vorherrschen. So treten bei diesen Anlagen neue mechanische Beanspruchungen aus Wellen und korrosive Einflüsse durch die salzhaltige Umgebung auf. Die Konzepte für die Tragstrukturen in 30 bis 40 Meter Wassertiefe sind ebenfalls nicht mit den konventionellen Fundamenten der Onshore-WEA zu vergleichen.

Seit einigen Jahren forschen mehrere Institute an der Leibniz Universität auf diesem Gebiet. Die bisherigen Ergebnisse wurden in zahlreichen nationalen und internationalen Beiträgen [Gigawind] publiziert.

Innerhalb des Verbundforschungsprojekts »Probabilistische Sicherheitsbewertung von Offshore-Windenergieanlagen« werden seit November 2009 Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtungen speziell für OWEA durchgeführt. Dieses Projekt, an dem elf Institute der Fakultäten für Bauingenieurwesen und Geodäsie, für Maschinenbau

und für Elektrotechnik an der Leibniz Universität Hannover beteiligt sind, wird im Auftrag des Ministeriums für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen unter der Koordination von ForWind [ForWind] bearbeitet.

Im Rahmen dieses Projektes sollen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekte für die Tragstruktur sowie für die mechanischen und elektrischen Anlagenteile untersucht werden. Hervorzuheben ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Diese zeichnet sich im Bereich der Sicherheitsanalyse durch vereinheitlichte methodische Ansätze und abgestimmte Datenbasen aus. Als Ergebnis wird angestrebt, die Zuverlässigkeit der gesamten Anlage sowie einzelner Anlagenteile und Bauteilkomponenten zu bestimmen und zu optimieren.

Was ist Sicherheit?

Der Begriff »Sicherheit« unterliegt einer sehr weitläufigen Definition. Im Folgenden wird auf die »Technische Sicherheit« eingegangen, nach der ein technisches Produkt dann als sicher eingestuft wird, wenn die verbleibenden Restrisiken das (gesellschaftlich vertretbare) Grenzkrisiko nicht übertreffen. Als Risiko wird dabei das Produkt aus Versagenswahrscheinlichkeit und Schadensfolgen verstanden. Somit ist es nahe liegend, die Versagenswahrscheinlichkeit als Bewertungsmaß heranzuziehen. Im Bauwesen wird als umgerechnetes Maß für die Versagenswahrscheinlichkeit ein Zuverlässigkeitsindex β für einen festgelegten Nutzungszeitraum definiert. In Abhängigkeit dieses Zuverlässigkeitsindex können Sicherheitselemente für die Bemessung von Tragwerken bestimmt werden.

Die Zuverlässigkeit eines Tragwerks wird durch einen

ausreichend großen (Sicherheits-)Abstand zwischen der Beanspruchung und dem Tragwiderstand eines Bauteils oder Tragwerks gewährleistet. Bei Offshore-Konstruktionen entstehen die Beanspruchungen wie Verformungen oder Spannungen aus den vorhandenen Einwirkungen wie Wind- und Wellenkräften. Unter dem Tragwiderstand wird die Beanspruchbarkeit

werden als die Widerstandsgrößen, treten Schäden auf bis hin zum Bauteil- oder Tragwerksversagen.

In Natur und Technik gibt es keine deterministischen Größen. Dennoch werden Einwirkungen wie Windgeschwindigkeiten oder Widerstandsgrößen wie Stahlfestigkeiten in den Regelwerken als einzelne Zahlenwerte angegeben. All diese Größen



Abbildung 1 (gegenüber)
OWEA Alpha Ventus
Quelle: DOTI 2009/Matthias Ibeler aus [AV]

Abbildung 2
Experimentelle Untersuchungen eines Pfahls mit dem Durchmesser 50 Zentimeter bei einer Wellenhöhe von 1,40 Meter im Großen Wellenkanal
Quelle: Franzius-Institut, LUH



Abbildung 3
Tripods als Unterstruktur für Alpha Ventus
Quelle: Offshore-Stiftung/Multibrid/Jan Oelker, 2009 aus [AV]

verstanden, also das, was ein Bauteil an Verformungen oder Spannungen schadensfrei aufnehmen kann. Dieser Tragwiderstand resultiert aus den Bauteilabmessungen und den vorhandenen Baustoffeigenschaften wie zum Beispiel die Materialfestigkeit der Stahlbauteile. Wenn die Beanspruchungen größer

weisen jedoch Streuungen auf, die statistisch ausgewertet und statistischen Verteilungen mit entsprechenden Verteilungsparametern wie Mittelwert, Median oder Standardabweichung zugeordnet werden können.

In den statischen oder dynamischen Berechnungen für



Abbildung 4
 Jackets als Unterstruktur für
 Alpha Ventus
 Quelle: Matthias Ibeler aus [AV]

Hochbauten und Brücken aber auch für WEA und OWEA werden deterministische Werte angesetzt und der Sicherheitsabstand zwischen Beanspruchung und Tragwiderstand mit einer festen Größe postuliert. In den derzeitigen Regelungen werden dabei für OWEA die gleichen

Sicherheitsabstände wie für WEA an Land angesetzt. Um diesen Sicherheitsabstand für OWEA genauer zu erfassen, sollen Berechnungen unter Ansatz der statistischen Verteilungen durchgeführt werden. Dieses Verfahren der probabilistischen oder auch wahrscheinlichkeitsthe-

oretischen Berechnung führt als Ergebnis zu sogenannten operativen Versagenswahrscheinlichkeiten, also Versagenswahrscheinlichkeiten, bei denen menschliche Fehlhandlungen nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 5
 Großwälzlagerprüfstand
 Quelle: Eilhauer Maschinenbau GmbH



Für übliche Tragwerke wie Hochbauten oder Brücken existieren Sicherheitselemente, die einen ausreichenden Abstand zwischen Beanspruchung und Widerstand herstellen und mit probabilistischen Verfahren kalibriert wurden. Für den Bau von

ereignissen im Fokus der Untersuchungen. Die Wind-, Strömungs- und Wellenverhältnisse müssen realitätsnah bestimmt werden (Abbildung 2). Zudem gehen auch die zufällige Verteilung der Materialkennwerte sowie die sehr stark streuenden Bodenpara-

Praxis geschaffen, die speziell auf die Bedingungen von OWEA ausgelegt sind und ein definiertes Sicherheitsniveau aufweisen.

Maschinenbau

Da die Überwachung und Schadensfrüherkennung bei

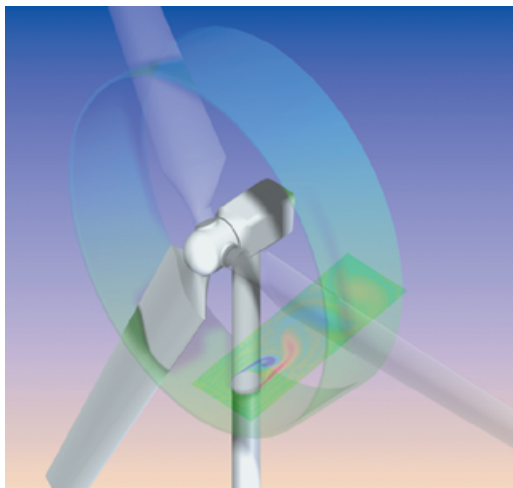


Abbildung 6 (links)
 CFD Modell zur Berechnung von aerodynamischen Lasten bei der Interaktion zwischen Rotor und Turm mit einem 2D-Contur-Plot der Vorticity
 Quelle: TFD, LUH

Abbildung 7
 Innenansicht einer Windenergieanlage mit Getriebe und Generator
 Quelle: Bosch Rexroth AG

OWEA werden derzeit Erfahrungen aus dem Bereich des maritimen Bauens sowie der Errichtung von WEA an Land genutzt. Eine Kalibrierung und Verifizierung der dabei angesetzten Sicherheitselemente für OWEA steht jedoch noch aus und soll in diesem Projekt thematisiert werden.

Untersuchungsschwerpunkte

Bauingenieurwesen

Die beteiligten Institute aus dem Bereich des Bauingenieurwesens befassen sich mit der Gründung und der Tragstruktur sowie den darauf einwirkenden Kräften. Bei OWEA resultieren die maßgebenden Kräfte aus dem Wind, dem Seegang und der Anlage am Turmkopf (Abbildung 1). Diese Einwirkungen und die daraus resultierenden Beanspruchungen (Verformungen, Schnittgrößen, Spannungen) werden mit ihren statistischen Parametern erfasst. Dabei stehen auch Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Extrem-

meter in die Untersuchungen ein.

Ein wesentliches Ziel ist es daher, die statistischen Parameter der relevanten Eingangsgrößen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite möglichst genau zu erfassen. Auf der Grundlage dieser Parameter sollen dann erforderliche Sicherheitselemente durch eine probabilistische Berechnung ermittelt werden. Hierfür sind Versagensbedingungen zu formulieren, also Grenzzustände für die Konstruktion wie sie bei Überschreitung der zulässigen Spannungen oder Verformungen auftreten.

In diesem Projekt sollen derzeit gängige Gründungsvarianten für OWEA untersucht werden. So sind entsprechende Auswertungen für die Gründungsstrukturen Tripod (Abbildung 3), Jacket (Abbildung 4), Tripile, und Schwergewichtsgründung geplant.

Auf diese Weise werden Sicherheitselemente für die

mechanischen Bauteilen wesentlich zur Erhöhung der Zuverlässigkeit einer WEA beiträgt, werden im aktuellen Projekt speziell angepasste Diagnosekonzepte und Überwachungsmöglichkeiten entwickelt. Einen Arbeitsschwerpunkt bildet die Schadenfrüherkennung und Lebensdauervorhersage an großen Wälzlagern mit weiterentwickelten Condition-Monitoring-Verfahren. Ausgehend von WEA-spezifischen Lastkollektiven werden in experimentellen Untersuchungen die Bauteilreaktionen analysiert und ihre Abhängigkeit auf die Lebensdauer bestimmt. Die zunächst kleinmaßstäblichen Lebensdauer-Versuche werden anschließend durch Versuche im Originalmaßstab am Großwälzlerprüfstand ergänzt und abgesichert (Abbildung 5).

Der Turmschaft der WEA und die Rotorblätter unterliegen einer gegenseitigen aerodynamischen Beeinflussung. Zum Zeitpunkt, wenn das Rotorblatt den Turm der WEA

passiert, treten veränderte Strömungsbedingungen auf, die zu zusätzlichen Lasten für die Rotorblätter führen. Die daraus resultierenden Erfordernisse sollen für OWEA analysiert werden. Dabei bilden stochastische Windfelder die Grundlage für die anzusetzenden Strömungssimulationen (Abbildung 6).

Elektrotechnik

Generatoren wandeln mechanische in elektrische Energie um (Abbildung 7). Bei Fehlern und Schäden entstehen charakteristische Änderungen im erzeugten Magnetfeld im Luftspalt. Diese Sensitivität

des Magnetfeldes soll bei der Entwicklung von Diagnosesystemen zur Schadenfrüherkennung bei den Generatoren in WEA genutzt werden.

Eine hohe Bedeutung hat die Zuverlässigkeit des elektrischen Gesamtsystems, da hiermit hohe Kosten beziehungsweise Einspeisevergütungsausfälle verbunden sein können. Aus diesem Grund sollen verschiedene Umrichtersysteme, elektrische Strukturkonzepte für Offshore-Windparks und ihre Netzanbindung zuverlässigkeitstheoretisch untersucht werden. Dafür werden Daten

zum Ausfallverhalten aller Betriebsmittel zusammengetragen und in ein probabilistisches Gesamtmodell eingebunden, so dass eine Versorgungszuverlässigkeit berechnet werden kann. In diese Betrachtungen fließt auch die stochastische Verteilung der Windleistung und ihrer Verteilung im Windpark ein. Diese beeinflusst durch die Wechselwirkungen einerseits in sehr hohem Maße die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten und andererseits hängt auch die Gesamtzuverlässigkeit davon ab, ob ein Ausfall bei starker oder schwacher Windleistung auftritt.

Autoren:

Boso Schmidt, Dr.-Ing. Michael Hansen, Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes, Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Beteiligte Wissenschaftler:

Franzius Institut:

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann, Arndt Hildebrandt, Mayumi Wilms

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, FG Leistungselektronik und

Antriebsregelung:

Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens, Dr.-Ing. Andreas Averberg, Felix Fuchs

Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, FG Elektrische Maschinen und

Antriebssysteme:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick, Dr.-Ing. Jörn Steinbrink, Meike Wehner

Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, FG Elektrische Energieversorgung:

Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann, Christian Rathke

Institut für Baustoffe:

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus, Dr.-Ing. Thomas Steinborn, Michael Werner

Institut für Massivbau:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grünberg, Dr.-Ing. Michael Hansen, Boso Schmidt

Institut für Stahlbau:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann, Anne Bechtel

Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau:

Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus, Dr.-Ing. Florian tom Würden, Dr. Khalid Abdel-Raman

Institut für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Tribologie:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll, Sebastian Otto, Dr.-Ing. Ulrich Wischhöfer

Institut für Statik und Dynamik:

Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes, Dr.-Ing. Martin Kohlmeier, Rana Meyering, Tanja Griebmann

Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume, Christoph Natkaniec, Rovens Kuschel, Benedikt Ernst

Adressen, Hinweise, Informationen

- [BMU] · www.erneuerbare-energien.de/inhalt/print/4642/
- [Gigawind] · www.gigawind.de
- [ForWind] · www.forwind.de
- [AV] · www.alpha-ventus.de
- [PSB-OWEA] · www.psb.uni-hannover.de

ForWind ist das Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen. Auf dem Gebiet der Windenergieforschung deckt ForWind ein breites ingenieurwissenschaftliches und physikalisches Spektrum ab und ist ein versierter Ansprechpartner für die Industrie.

Weitere Informationen zu den Inhalten der einzelnen Teilprojekte und zu den beteiligten Instituten können [PSP-OWEA] entnommen werden.