

DISS. ETH Nr. 19568

# **MONITORING BASED CONDITION ASSESSMENT OF OFFSHORE WIND TURBINE SUPPORT STRUCTURES**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH  
for the degree of  
Doctor of Sciences  
presented by

Sebastian Thöns  
Diplom Ingenieur, Technische Universität Berlin and  
Master of Science, University of Manchester Institute of Science and Technology

born 23.11.1975  
citizen of  
Federal Republic of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Michael Havbro Faber, examiner  
Prof. Dr.-Ing. Werner Rücker, co-examiner  
Prof. Dr. Mario Fontana, co-examiner

2011

## **Abstract**

A central societal need in developed countries is the energy production with a low environmental impact. Thus ambitious energy programs have been initiated aiming at the establishment of renewable energies as a main contributor to the energy mix in the next decade. Like no other renewable energy, the offshore wind energy possesses a high potential and constitutes the main contributor to this aim.

The development of large scale wind parks is one of the major challenges in the offshore industry today while the first wind parks of significant size and in considerable water depths are being built. In preparation for the next step, this thesis aims to contribute to the efficient and cost effective operation of wind parks. It specifically addresses the support of the inspection and maintenance activities of offshore wind turbines by the development of methods for the assessment and monitoring of support structures.

The essential finding of this thesis is that the operation efficiency of wind turbine structures can be significantly enlarged by monitoring based assessment procedures. It is found that a substantial expected life-cycle benefit for the operation can be achieved by the conceptual integration of structural monitoring techniques in the structural reliability theory. The integration should be bidirectional in the sense that the generic design decisions for structural monitoring systems are based on a structural reliability assessment and that simultaneously a possible reduction of the uncertainty associated with the condition is utilized for the structural reliability assessment and thus for the inspection and maintenance planning.

The thesis covers the issues of

- (I) the integration of monitoring data in the framework for structural reliability assessment of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS),
- (II) the issue of the consistent determination of the measurement uncertainties utilizing all available information of the measurement process,
- (III) the issue of the application of monitoring techniques for structural integrity management and
- (IV) the establishment of a full probabilistic performance model basis for the support structure of an offshore wind turbine.

To cover these issues the thesis comprises (1) the development of probabilistic structural, loading and limit state models, (2) a response surface algorithm for a multiple component reliability analysis, (3) a reliability analysis of an offshore wind turbine support structure applying the model basis, (4) a framework for the determination of measurement uncertainties utilizing process and observation data and (5) concepts for utilizing monitoring data in a structural reliability analysis as well as for the risk based inspection planning.

The starting point of this thesis is the development of the model basis containing the models for the structural performance of a reference case, namely a support structure of an offshore wind turbine. The model basis comprises the structural, loading and probabilistic characterization of the ultimate, fatigue and the serviceability limit states and is derived considering the constitutive physical equations. The introduced models for the structural performance and loads account for design, production and execution information. A sensitivity study is performed on the basis of a non-linear coefficient of

correlation. The process of establishing and analyzing these models contributes to an enhanced understanding of the performance of the structure and is documented in detail.

The reliability analysis of an offshore wind turbine support structure builds upon the developed model basis. In order to facilitate the reliability analysis with such complex multiple component models, an adaptive response surface algorithm is developed. This algorithm utilizes clustered experimental designs in combination with an efficient augmentation scheme for these designs. The results of the reliability analyses comprise the system reliabilities and the probabilities of failure for the components in the individual limit states. With these results critical components are identified. A comparison with the target reliabilities specified in DIN EN 1990 (2002) shows that the target reliabilities are met.

A novel contribution, as mentioned above, constitutes a new approach for the determination of measurement uncertainties in the context of the structural reliability theory. This approach builds upon two types of measurement uncertainties (as defined in the ISO/IEC Guide 98-3 (2008a)), namely the uncertainty based on a statistical analysis of observations and the uncertainty derived from a process equation describing physically the measurement process. Both types of measurement uncertainties are utilized for the derivation of a posterior measurement uncertainty by Bayesian updating. This facilitates the quantification of a measurement uncertainty using all available data of the measurement process. The measurement uncertainty models derived are analyzed through a sensitivity study and are discussed in detail resulting in an identification of the most relevant sources of measurement uncertainties.

For the utilization of monitoring data in a structural reliability analysis the approach for the determination of measurement uncertainties data is applied. Monitoring data can be interpreted in two ways, namely as probabilistic loading model information and as probabilistic resistance model information, i.e. proof loading. For both ways the influence of the measurement uncertainties on the structural reliability is shown and how the specific modeling of monitoring data in a reliability analysis can result in a reduction of uncertainties and as a consequence in an increase of the reliability. The proof loading concept is developed further to account for probabilistic proof loading information, i.e. information subjected to measurement uncertainties. In conjunction with an alternative proof loading concept utilizing Bayesian updating techniques, a criterion to facilitate a consistent choice of the appropriate proof loading method is developed.

The developed approaches and the findings are applied in a life-cycle cost-benefit analysis comprising the expected costs of failure, of inspection, of repair and of the monitoring system as well as its operation. Here, concepts for the design decision support of monitoring systems are introduced by formulating the life-cycle cost-benefit analysis as an optimization problem. On this basis, it can be determined which components should be monitored to achieve a life cycle benefit. Furthermore, an approach for the reduction of monitoring period is introduced. The most significant result of the cost-benefit analysis is that a substantial expected life-cycle benefit is achievable by the application of the developed concepts.

## Zusammenfassung

Eine zentrale gesellschaftliche Notwendigkeit der Industrieländer ist die umweltfreundliche Energieproduktion. Hierfür wurden ambitionierte Programme mit dem Ziel entwickelt, die erneuerbaren Energien als einen wesentlichen Bestandteil des zukünftigen Energiemixes zu etablieren. Wie keine andere erneuerbare Energie besitzt die Offshore-Windenergie ein hohes Potential und kann dadurch den größten Teil zu diesem Ziel beitragen.

Die Entwicklung von groß angelegten Windparks ist derzeit die Herausforderung der Windenergieindustrie. Momentan werden die ersten kommerziellen Windparks signifikanter Größe in einer Wassertiefe von 30 m bis 40 m errichtet. Zur wissenschaftlichen Vorbereitung des nächsten Schrittes hat diese Dissertation einen effizienten und kosteneffektiven Betrieb von Offshore-Windparks zum Ziel. Im Speziellen wird die Unterstützung des Betriebs von Offshore-Windenergieanlagen durch die Entwicklung einer Inspektions- und Wartungsplanung für die Gründungsstrukturen, basierend auf Bewertungs- und Überwachungsverfahren, behandelt.

Das grundlegende Ergebnis dieser Dissertation ist, dass die Kosteneffizienz des Betriebs durch die Anwendung von überwachungsbasierten Zustandsbewertungsverfahren signifikant gesteigert werden kann. Die Steigerung der Kosteneffizienz des Betriebs bedeutet dabei eine substantielle Senkung der erwarteten Lebenszykluskosten, welche durch die konzeptionelle Integration von Überwachungsverfahren und der Zuverlässigkeitstheorie erreicht werden kann. Die konzeptionelle Integration sollte dabei bidirektional erfolgen, d. h. dass die generischen Entscheidungen für die Auslegung eines Überwachungssystems auf der Grundlage der Tragwerkszuverlässigkeitstheorie erfolgen und dass gleichzeitig eine mögliche Reduktion der Unsicherheiten des Zustandes der Struktur für die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit und somit für die Inspektions- und die Wartungsplanung eingesetzt wird.

In dieser Dissertation werden die folgenden Schwerpunkte behandelt:

- (I) Die konzeptionelle Integration von Überwachungsdaten in das Rahmenwerk für die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit des Joint Committee on Structural Safety (JCSS),
- (II) Die konsistente Bestimmung der Messunsicherheiten unter Verwendung aller verfügbaren Informationen des Messprozesses,
- (III) Die Verwendung von Überwachungsdaten für das Management der Tragwerksintegrität und
- (IV) Die Entwicklung einer vollständig probabilistischen Modellgrundlage für die Gründungsstruktur einer Offshore-Windenergieanlage.

Um diese Schwerpunkte abzudecken, umfasst die vorliegende Dissertation (1) die Entwicklung von probabilistischen strukturmechanischen Modellen, Lastmodellen und Grenzzustandsmodellen, (2) die Entwicklung eines Antwortflächenverfahren für die Zuverlässigkeitsanalyse mit komplexen Modellen (4) eine Zuverlässigkeitsanalyse der Gründungsstruktur einer Offshore-Windenergieanlage, (3) einen Ansatz für die Bestimmung von Messunsicherheiten unter Verwendung aller Informationen des Messprozesses und (4) Konzepte für die Verwendung von Überwachungsdaten in der Zuverlässigkeitsanalyse sowie für die Risikobasierte Inspektionsplanung.

Am Anfang der Dissertation steht die Entwicklung der Modellgrundlage für das Strukturverhalten des Referenzbeispiels, der Gründungsstruktur einer Offshore-Windenergieanlage. Die Modellgrundlage wurde ausgehend von den grundlegenden physikalischen Gleichungen abgeleitet und umfasst probabilistische strukturmechanische

Modelle und probabilistische Lastmodelle für die Grenzzustände der Tragfähigkeit, der Ermüdung und der Gebrauchstauglichkeit. Bei der Entwicklung der Modellgrundlage wurden Entwurfs-, Produktions- und Ausführungsinformationen berücksichtigt. Der Prozess der Entwicklung und der Analyse der Modellgrundlage trägt zu einem erweiterten Verständnis des Strukturverhaltens, einschließlich der Identifikation der sensitiven Modellparameter durch eine Sensitivitätsanalyse, bei und wurde detailliert dokumentiert.

Die Zuverlässigkeitsanalyse der Gründungsstruktur baut auf der entwickelten Modellgrundlage auf. Um die Zuverlässigkeitsanalyse mit dieser komplexen Modellgrundlage zu ermöglichen, wurde ein adaptives Antwortflächenverfahren entwickelt. Dieses Verfahren verwendet gruppierte, experimentelle Stichprobenentwürfe und ein effizientes Erweiterungsverfahren dieser Stichprobenentwürfe. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse sind die Systemzuverlässigkeiten und die Zuverlässigkeiten der Komponenten. Ein Vergleich mit den Zielzuverlässigkeiten nach DIN EN 1990 (2002) zeigt, dass diese eingehalten werden. Weiterhin wurden die kritischen Komponenten der Struktur identifiziert.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Dissertation, wie oben erwähnt, stellt der neue Ansatz zur Bestimmung der Messunsicherheiten unter Berücksichtigung Tragwerkszuverlässigkeitstheorie dar. Dieser Ansatz baut auf zwei Arten von Messunsicherheiten nach ISO/IEC Guide 98-3 (2008a) auf, das heißt auf der Messunsicherheit modelliert durch eine Prozessgleichung und auf der Messunsicherheit bestimmt durch eine statistische Beschreibung der Beobachtungen des Messprozesses. Beide Arten der Messunsicherheit werden für die Berechnung der A-posteriori Messunsicherheit durch Bayes'sche Aktualisierung verwendet. Damit kann die Messunsicherheit auf der Grundlage aller zur Verfügung stehenden Informationen abgeleitet werden. Die Modelle für die Berechnung der Messunsicherheiten wurden mit einer Sensitivitätsstudie analysiert und diskutiert. Im Ergebnis konnten die Parameter identifiziert werden, welche am meisten zur Messunsicherheit beitragen.

Für die Verwendung von Überwachungsdaten in der Zuverlässigkeitsanalyse wird der Ansatz für die Bestimmung der Messunsicherheiten angewendet. Überwachungsdaten können dabei auf zwei Arten interpretiert werden. Sie können dem Lastmodell zugeordnet werden oder als ein Belastungstest interpretiert werden, d.h. dem Widerstandsmodell zugeordnet werden. Für beide Varianten wird der Einfluss der Messunsicherheit auf die Tragwerkszuverlässigkeit gezeigt und es wird diskutiert, wie die Verwendung von Überwachungsdaten zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit führen kann. Das Trunkierungskonzept für die Integration von Belastungstestergebnissen in die Zuverlässigkeitsanalyse wurde in Hinblick auf die Integration von probabilistischen Belastungstestergebnissen, d. h. von Belastungstestergebnissen behaftet mit Messunsicherheiten, weiterentwickelt. Im Zusammenhang mit einem alternativen Konzept, auf der Grundlage der Bayes'schen Aktualisierung, wurde ein Kriterium für eine konsistente Anwendung des jeweils zutreffenden Ansatzes entwickelt.

Die entwickelten Ansätze und Ergebnisse werden für eine Lebenszykluskostenanalyse angewendet. Diese schließt erwartete Kosten infolge Versagen, Inspektionen, Reparatur und Überwachung ein. Weiterhin werden Konzepte zur Entscheidungsunterstützung für den Entwurf eines Überwachungssystems, durch die Formulierung der Lebenszykluskostenanalyse als ein Optimierungsproblem, eingeführt. Auf dieser Grundlage kann entschieden werden, welche und wie viele Komponenten überwacht werden sollten, um einen Vorteil für die Lebenszykluskosten zu erreichen. Das wichtigste Ergebnis dieses Kapitels ist, dass ein substantieller erwarteter Lebenszykluskostenvorteil durch die Anwendung der entwickelten Verfahren erreicht werden kann.