

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Strukturüberwachung und -beurteilung von
Windenergieanlagen und Offshorestationen

VDI 4551

Structure monitoring and assessment of
wind turbines and offshore stations

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	2	Preliminary note.....	2
Einleitung.....	3	Introduction.....	3
1 Anwendungsbereich.....	4	1 Scope.....	4
2 Abkürzungen.....	5	2 Abbreviations.....	5
3 Ziele und Aufgaben der Strukturüberwachung (SHM)	5	3 Objectives and tasks of structural health monitoring (SHM).....	5
3.1 Aufgaben der Strukturüberwachung	6	3.1 Tasks of structural health monitoring	6
3.2 Management der Strukturüberwachung.....	7	3.2 Management of structural health monitoring	7
3.3 Planungsgrundlagen und empfohlene Vorgehensweise	10	3.3 Planning criteria and recommended approach.....	10
4 Inspektionsstrategien und Lebensdauerprognosen	12	4 Inspection strategies and service life forecasts	12
4.1 Risikobasierte Inspektionsstrategien	12	4.1 Risk-based inspection strategies	12
4.2 Prognosemodelle und Lebensdauermanagement.....	13	4.2 Prognostic models and life cycle management.....	13
4.3 Steuerungsoptimierung	16	4.3 Control optimisation	16
5 Tragstrukturen und Modelle von Windenergieanlagen und Plattformen.....	17	5 Supporting structures and models of wind turbines and platforms.....	17
5.1 Tragstrukturen von Windenergieanlagen	17	5.1 Supporting structures of wind turbines	17
5.2 Tragstrukturen von Plattformen für Offshorewindparks.....	18	5.2 Supporting structures of platforms for offshore wind farms.....	18
5.3 Grundsätze der Modellierung.....	21	5.3 Fundamentals of modelling	21
5.4 Referenzgrößen der Tragstruktur	23	5.4 Supporting structure reference quantities.....	23
5.5 Grenzzustände und Zustandskenngrößen	27	5.5 Limit states and state characteristics	27
6 Wiederkehrende Prüfungen	29	6 Periodic inspections.....	29
6.1 Structural Health Monitoring im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung....	29	6.1 Structural health monitoring as part of periodic inspection.....	29
6.2 Untersuchungen und Messungen im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen.....	30	6.2 Investigations and measurements as part of periodic inspections	30
7 Einwirkungen und Beanspruchungen	35	7 Impacts and loads	35
7.1 Lastermittlung	36	7.1 Load determination.....	36
7.2 Lastanalyse.....	37	7.2 Load analysis	37

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)

Fachbereich Schwingungstechnik

VDI-Handbuch Schwingungstechnik

Inhalt	Seite
8 Designüberprüfung, Zustandsüberwachung und Schadenserfassung	38
8.1 Designüberprüfung	38
8.2 Zustandsüberwachung, Betriebsüberwachung.....	39
8.3 Schadenserfassung	47
9 Messkonzept	50
9.1 Allgemeines	50
9.2 Messgrößen und Sensoren	52
9.3 Datenerfassung.....	55
9.4 Trassenführung/Messkabel	58
9.5 Installation und Wartung.....	58
9.6 Dokumentation.....	59
10 Anforderungen an das Structural Health Management	59
10.1 Notwendige Dokumente und Unterlagen.....	59
10.2 Verantwortlichkeiten und Qualifikation der Beteiligten.....	60
Anhang A Fehlertypen	63
Anhang B Lastüberwachung	66
Anhang C Zustandsüberwachung	69
C1 Grenzwerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	70
C2 Grenzwerte im Grenzzustand der Ermüdung.....	74
C3 Grenzwerte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	77
Anhang D Rissdetektion und -fortschrittsüberwachung	79
Schrifttum	81

Contents	Page
8 Design test, condition monitoring and damage assessment	38
8.1 Design test	38
8.2 Condition monitoring, operation monitoring	39
8.3 Damage assessment	47
9 Measuring concept	50
9.1 General	50
9.2 Measured variables and sensors.....	52
9.3 Data acquisition	55
9.4 Routing/measurement cables	58
9.5 Installation and maintenance	58
9.6 Documentation.....	59
10 Requirements for structural health management	59
10.1 Necessary documents and records	59
10.2 Responsibilities and qualification of parties involved.....	60
Annex A Types of defects/errors	63
Annex B Load monitoring	66
Annex C Condition monitoring	69
C1 Limit values in load-bearing capacity's limit state	70
C2 Limit values in fatigue's limit state	74
C3 Limit values in serviceability's limit state	77
Annex D Crack detection and propagation monitoring	79
Bibliography	81

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/4551.

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/4551

Einleitung

In Deutschland entwickelt sich die Windenergie zu einer der wichtigsten Energiequellen. Derzeit sind in Deutschland bereits einige zehntausend Windenergieanlagen (WEA) errichtet und in Betrieb. Viele weitere Onshore- und Offshore-WEA werden derzeit gebaut oder sind in der Planungs- oder in der Genehmigungsphase. Diese sich sehr schnell entwickelnde Technologie ist jedoch noch nicht vollständig mit den entsprechenden qualifizierten und zertifizierten Instrumenten für messtechnische Überwachung, Wartung, Instandhaltung und Lebensdauermanagement ausgestattet. Dies gilt insbesondere für die Tragstrukturen von WEA und Offshorestationen.

Zur Aufrechterhaltung der Betriebsgenehmigung von WEA ist gegenüber den Behörden die strukturelle Integrität durch wiederkehrende Prüfungen (WKP) nachzuweisen. Hierbei kommen zunehmend *permanente Überwachungssysteme* zum Einsatz. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Condition Monitoring Systeme (CMS) haben sich für die Maschinenkomponenten als sehr geeignet erwiesen. Die Methoden für das Condition Monitoring von Maschinenkomponenten unterscheiden sich jedoch in wesentlichen Teilen von den Überwachungsverfahren für Tragstrukturen, die in der Regel keine rotierenden Teile besitzen und keine vordefinierten Drehfrequenzen erkennen lassen. Daher unterscheidet diese Richtlinie zwischen dem Condition Monitoring der Maschinen und dem Structural Health Monitoring (SHM) der Tragstrukturen. Für die Überwachung der Tragstruktur mit Gründung sind geeignete Verfahren jedoch noch nicht allgemein anerkannt und zertifiziert, sodass die Betreiber von WEA auf individuelle Lösungen und Genehmigungen zurückgreifen müssen. Diese Richtlinie beschreibt den Stand der Technik von Überwachungsverfahren für Tragstrukturen und grenzt dabei Lösungen, die heute technisch und kommerziell realisierbar sind, von Lösungen ab, die derzeit wissenschaftlich untersucht oder entwickelt werden und eine Zusatzausstattung anbieten.

Die Richtlinie richtet sich an Eigentümer und Verfügungsberechtigte, vor allem jedoch auch an die beteiligten Fachleute, z.B. Betreiber, planende und beratende Ingenieure, Prüflingenieure und Prüfsachverständige für Standsicherheit, Bauabteilungen von Industrie- und Privatunternehmen, Genehmigungsbehörden und Versicherer. Mithilfe dieser Richtlinie ist eine strukturierte Vorgehensweise möglich, wobei praktische Arbeitsunterlagen, Entscheidungshilfen, bewährte Checklisten und weitere Kriterien für ein einwandfreies technisches Handeln angeboten werden. Zusätzlich werden Verfahren

Introduction

In Germany, wind energy is becoming one of the most important sources of energy. Several tens of thousands of wind turbines (WT) have been constructed and are currently in operation. Many additional onshore and offshore WT are being constructed or in the process of being planned or approved. However, this rapidly developing technology is not yet fitted with appropriately qualified and certified instruments for metrological monitoring, preventive maintenance, maintenance and life cycle management. This is especially true for the supporting structures of WT and offshore stations.

To keep the operating licence of WT, their structural integrity must be proved to authorities through periodic inspections (PI). To this end, *permanent monitoring systems* are increasingly being used. The Condition Monitoring Systems (CMS) currently available on the market have proved particularly suitable for the machine components. However, the methods used for the condition monitoring of machine components substantially differ from the monitoring processes for supporting structures, which usually do not have any rotating parts and do not show any predefined rotational frequencies. Therefore, the present standard differentiates between the condition monitoring of machines and the structural health monitoring (SHM) of supporting structures. However, suitable processes for monitoring supporting structures including their foundations are not yet commonly recognised and certified. Therefore, WT operators must consider individual solutions and approvals. This standard describes the state of the art of monitoring processes for supporting structures, distinguishing solutions that can be realised technically and commercially today, from those solutions that are currently being developed or undergoing scientific research and offer supplementary equipment.

The standard is addressed to owners and those who are authorised to dispose of wind turbines, but mainly to the experts involved, e.g. operators, planning and consulting engineers, test engineers and certified inspectors for stability, construction departments of industrial and private businesses, approving authorities and insurers. This standard provides a structured approach offering useful documents, decision-making aids, proven checklists and additional criteria for sound technical action. In addition, processes are described that can be considered current state of research and that may become

erläutert, die heute dem Stand der Forschung zuzuordnen sind und sich in naher Zukunft zum Stand der Technik entwickeln können.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie enthält Beurteilungs- und Bewertungskriterien sowie Handlungsanleitungen für die Überwachung der Tragstrukturen von Onshore- und Offshore-WEA sowie von Offshoreplattformen. Grundsätzlich soll eine Strukturüberwachung (SHM) dann angewendet werden, wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen zutrifft:

- Die Betriebs- oder Umwelteinwirkungen variieren stark.
- Die Last-, Werkstoff-, Struktur-, Schädigungs- oder Versagensmodelle enthalten beträchtliche Unsicherheiten.
- Das angewendete Design führt zu erheblicher Über- oder Unterdimensionierung von Komponenten.
- Das System besteht aus mehreren, stark interagierenden Komponenten.
- Während der Lebensdauer sind unvorhergesehene Ereignisse sowie Veränderungen im System oder in seinen Komponenten zu erwarten.
- Eine Überwachung schwer zugänglicher Komponenten ist erforderlich.
- Die Folgekosten eines unplanmäßigen Schadens übersteigen wesentlich die Kosten einer Strukturüberwachung.

Der Nutzen einer Strukturüberwachung besteht dann unter anderem in der:

- Risikoreduzierung von Betriebsausfällen und Steigerung der Anlagenverfügbarkeit durch bessere Zustandserfassung, Schadensfrüherkennung und rechtzeitige Instandhaltungsmaßnahmen,
- Leistungsoptimierung auf der Basis von Vorhersagemodellen,
- Betriebskostenreduzierung durch Vermeidung von Großschäden und Ausfällen sowie durch vorausschauende Planung von Wartungsarbeiten,
- Verlängerung der Nutzungsdauer von existierenden Bauwerken durch messtechnische Erfassung von realen Beanspruchungen,
- Verbesserung von Design und wirtschaftliche Bemessung von neuen oder neuartigen Bauwerken auf der Basis von Messdaten der Dauerüberwachung.

Onshore- und insbesondere Offshore-WEA sind hochkomplexe Maschinen, die in vielfältiger Weise mit Turm und Fundament sowie der Umwelt inter-

state of the art in the near future.

1 Scope

This standard contains assessment and evaluation criteria as well as operational guidelines for monitoring supporting structures of onshore and offshore WT and offshore platforms. As a basic principle, structural health monitoring (SHM) is to be applied if at least one of the following conditions applies:

- The operational and environmental impacts vary considerably.
- The load, material, structure, damage and failure models show substantial uncertainties.
- The applied design results in components that are considerably over- or under-dimensioned.
- The system comprises several strongly interacting components.
- During the service life, unforeseen events and changes in the system or its components must be expected.
- It is necessary to monitor components that are difficult to access.
- The follow-up costs of any unplanned damage clearly exceed the costs of structural health monitoring.

The benefits of structural health monitoring include:

- reduction of the risk of breakdowns and increase of system availability through better condition assessment, early damage detection and timely maintenance measures,
- performance optimisation based on prediction models,
- reduction of operating expenses by preventing major damages and failures and by predictive planning of maintenance work,
- extension of the service life of existing structures by metrological recording of real stresses,
- improvement of design and economic dimensioning of new or novel structures based on measured data from permanent monitoring.

Onshore and particularly offshore WT are highly complex machines that interact with the tower, foundation and the environment in multiple ways.

agieren. Für diese Anlagen treffen alle oben genannten Anwendungskriterien zu. Der Nutzen einer Strukturüberwachung ist dementsprechend sehr hoch.

All of the above application criteria apply to these systems. As such, structural health monitoring offers substantial benefits.