

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Strukturüberwachung und -beurteilung von  
Windenergieanlagen und Offshorestationen

VDI 4551  
*Entwurf*

Structure monitoring and assessment of wind  
turbines and offshore stations

*Einsprüche bis 2019-01-31*

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchportal  
<http://www.vdi.de/einspruchportal>
- in Papierform an  
VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung  
Fachbereich Schwingungstechnik  
Postfach 10 11 39  
40002 Düsseldorf

Inhalt	Seite
Vorbemerkung .....	2
Einleitung .....	2
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	3
<b>2 Abkürzungen</b> .....	3
<b>3 Ziele und Aufgaben der Strukturüberwachung (SHM)</b> .....	3
3.1 Aufgaben der Strukturüberwachung .....	4
3.2 Management der Strukturüberwachung .....	4
3.3 Planungsgrundlagen und empfohlene Vorgehensweise .....	6
<b>4 Inspektionsstrategien und Lebensdauerprognosen</b> .....	7
4.1 Risikobasierte Inspektionsstrategien .....	7
4.2 Prognosemodelle und Lebensdauermanagement .....	7
4.3 Steuerungsoptimierung .....	9
<b>5 Tragstrukturen und Modelle von Windenergieanlagen und Plattformen</b> .....	9
5.1 Tragstrukturen von Windenergieanlagen .....	9
5.2 Tragstrukturen von Plattformen für Offshorewindparks .....	11
5.3 Grundsätze der Modellierung .....	12
5.4 Referenzgrößen der Tragstruktur .....	13
5.5 Grenzzustände und Zustandskenngrößen .....	15
<b>6 Wiederkehrende Prüfungen</b> .....	16
6.1 Structural Health Monitoring im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung ....	16
6.2 Untersuchungen und Messungen im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen .....	16
<b>7 Einwirkungen und Beanspruchungen</b> .....	19
7.1 Lastermittlung .....	19
7.2 Lastanalyse .....	20

Inhalt	Seite
<b>8 Designüberprüfung, Zustandsüberwachung und Schadenserfassung</b> .....	20
8.1 Designüberprüfung .....	20
8.2 Zustandsüberwachung, Betriebsüberwachung .....	21
8.3 Schadenserfassung .....	25
<b>9 Messkonzept</b> .....	27
9.1 Allgemeines .....	27
9.2 Messgrößen und Sensoren .....	27
9.3 Datenerfassung .....	29
9.4 Trassenführung/Messkabel .....	30
9.5 Installation und Wartung .....	30
9.6 Dokumentation .....	31
<b>10 Anforderungen an das Structural Health Management (SHM)</b> .....	31
10.1 Notwendige Dokumente und Unterlagen .....	31
10.2 Verantwortlichkeiten und Qualifikation der Beteiligten .....	31
<b>Anhang A Fehlertypen</b> .....	33
<b>Anhang B Lastüberwachung</b> .....	35
<b>Anhang C Zustandsüberwachung</b> .....	37
C1 Grenzwerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	37
C2 Grenzwerte im Grenzzustand der Ermüdung .....	39
C3 Grenzwerte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	41
<b>Anhang D Rissdetektion und -fortschrittsüberwachung</b> .....	43
Schrifttum .....	44

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)  
Fachbereich Schwingungstechnik

VDI-Handbuch Schwingungstechnik

## 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](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

An der Erarbeitung dieser Richtlinie waren beteiligt:

Dipl.-Ing. *Jörg Asmussen*, Hamburg

*Daniel Bossert*, Hamburg

Dr.-Ing. *Carsten Ebert*, Höchberg

*Oliver Feller*

Dipl.-Ing. *Andreas Friedmann* VDI, Darmstadt

Dr.-Ing. *Gerrit Haake* VDI, Hamburg

Dipl.-Ing. *Nils Heining* VDI, Hamburg

Dr. *Björn Heise*, Lehrte

Dr.-Ing. habil. *Sascha Henke*, Hamburg

Dr. *Holger Huhn*, Bremerhaven

Dr.-Ing. *Klaus Kerkhof* VDI, Stuttgart

Dr.-Ing. *Fabian Kirsch*, Berlin

Dr. *Martin Kohlmeier* VDI, Hannover

*Jens Krieger*, Oldenburg

*Jens Kühne*, Darmstadt

Dipl.-Ing. *Manuel Löhr*, Düsseldorf

Dr. *Thomas Neumann*, Wilhelmshaven

*Ulrich Oertel*, Rudolstadt

Prof. Dr.-Ing. *Yuri Petryna* VDI, Berlin

Prof. Dr.-Ing. *Werner Rücker* VDI, Berlin, Vorsitzender

Prof. Dr.-Ing. habil. *Stavros Savidis* VDI, Berlin

Dr.-Ing. *Lars Schubert*, Dresden

Assoc. Professor *Sebastian Thöns*, Lyngby (DK)

M.Sc. Eng. *Jef Vandenhout*, Leuven (B)

Prof. Dr. *Helmut Wenzel*, Wien (A)

Dr. *Stephan Zerbst*, Lehrte

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](http://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 Plattformen im Offshorebereich.

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 CM 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 CM 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, Prüfengeure und Prüf-sachverständige 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 wer-

den Verfahren 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 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 darin:

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