

Offshore Foundation Monitoring: Konzept eines globalen Monitoringverfahrens auf Basis des dynamischen Bauwerksverhaltens

Prof. **H. Wenzel**, VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, Wien
Dipl.Phys. **J. Krieger**, airwerk GmbH, Emstek

Kurzfassung

Die Offshore Wind Industrie ist vergleichsweise jung. Die Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen stellen ‚neuartige‘ Bauwerke dar, in der Hinsicht, dass

- es nur eine sehr kleine Datenbasis zu den Bemessungslasten gibt
- dadurch vergleichsweise hohe Teilsicherheitsfaktoren angesetzt werden müssen
- das Trag- und Verformungsverhalten des Bodens sehr komplex ist
- die Tragwirkung der Bauteile schwer berechenbar ist aufgrund von ungewöhnlich großen Stahldicken und Bauteildimensionen.

Insbesondere die Kombinationslasten aus Wind und Wellen sowie die Tragfähigkeit des Bodens unter Einwirkung zyklischer Lasten sind wichtige Themen für die statische Auslegung der Gründungsstrukturen.

Die messtechnische Überwachung der Gründungsstrukturen dient der Reduzierung oben genannter Unsicherheiten. In Deutschland schreibt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ein Condition Monitoring der Gründungsstrukturen sogar vor.

Des Weiteren schreibt das BSH die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen am Bauwerk vor. Bedingt durch die schwierigen Bedingungen offshore sind aber die klassischen Inspektionsverfahren für die wiederkehrenden Prüfungen, insbesondere an Bauteilen unter Wasser, teilweise nur bedingt oder gar nicht einsetzbar. Es besteht hier ein großes Interesse der Industrie, einen extensiven Einsatz von Taucharbeiten auf ein absolut notwendiges Minimum zu beschränken. Ziel dieser Beschränkung ist nicht nur eine erhebliche Kostenreduzierung im Betrieb eines Windparks, sondern darüber hinaus die Verringerung des Unfallrisikos bei Vermeidung der vergleichsweise risikoreichen Taucharbeiten.

Zurzeit existiert kein einheitlicher Standard für die Realisierung von SHM Systemen an Windkraftanlagen offshore. Viele der heute eingesetzten Systeme stellen **lokale** Monitoring Systeme dar, wie zum Beispiel ein Kolkmonitoring mit Echoloten. Diese sind oft mit aufwändiger Messtechnik auch unter Wasser und mit einem hohen Wartungsaufwand verbunden.

Im Gegensatz dazu wird im vorliegenden Beitrag ein **globales** SHM vorgestellt, dass die Bauwerksdynamik mit ‚Ambient Vibration Monitoring‘ Methoden überwacht.

Die Vorteile sind:

- Einsatz von langjährig erprobter Messtechnik (Beschleunigungsaufnehmer)
- Es ist möglich, mit wenigen Sensoren auszukommen
- Sensoren können über Wasser an leicht zugänglichen Stellen positioniert werden
- Es reduziert sich der Kostenaufwand bei Installation, aber insbesondere auch im Betrieb des Messsystems

‚Structural Health Monitoring (SHM)‘ Systeme zur Überwachung des dynamischen Bauwerksverhaltens werden beiden einleitend genannten Zielen gerecht:

- Erfüllung der BSH Forderung nach einem CMS der Gründungsstruktur
- Ergänzung der wiederkehrenden Prüfung zur Verringerung der Kosten und des Risikos durch den Einsatz von Tauchern

1. Offshore Foundation Monitoring und Wiederkehrende Prüfungen – Hintergrund und Markttrend

In der Bundesrepublik Deutschland wird die Errichtung und der Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen durch das BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) geregelt. Im Besonderen sind hier die beiden Standards ‚Baugrunderkundung für Offshore-Windenergieparks‘ und ‚Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen‘ zu nennen. Das BSH schreibt den Einsatz eines Condition Monitoring Systems für 1/10 der Tragstrukturen eines Windenergie-Parks vor. Die konkrete Ausgestaltung des Systems gibt das BSH aber nicht vor. Stattdessen muss der Windpark Betreiber ein schlüssiges Konzept vorlegen.

Des Weiteren schreibt das BSH in demselben Standard ‚Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen‘ die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen an den Strukturen der Offshore-Windkraftanlagen vor.

In der gegenwärtigen Praxis werden aufgrund der mangelnden Vorgaben bezüglich der Ausführung sehr unterschiedliche Monitoring-Systeme umgesetzt. Oft ist darüber hinaus die Zielsetzung dieser Systeme nur ungenügend definiert. Gleichzeitig erweist sich die

Ausführung der Wiederkehrenden Prüfungen als sehr aufwändig, gefährlich (Einsatz von Tauchern), kostenintensiv und bezüglich der Ergebnisse aufgrund der sehr schlechten Zugänglichkeit als unbefriedigend.

Ziel muss es sein, Monitoring-Systeme in die Inspektionskonzepte einzubinden - mit dem Ziel, gleichzeitig Kosten zu sparen und die Inspektion zielgerichteter ausführen zu können. Möglich wird diese Verknüpfung, wenn man zustandsbasierte oder risikobasierte Inspektionskonzepte anwendet.

Gegenwärtig gibt es weltweit und in vielen Industrien Bestrebungen, zustandsbasierte/risikobasierte Inspektionskonzepte zu entwickeln und anzuwenden. Als ein Beispiel unter vielen sei an dieser Stelle das europäische Safelife-X Projekt genannt, in dem unter anderem Normen und ‚Guidelines‘ zum ‚Risk based Inspection‘ entwickelt werden.

Speziell für Offshore-Strukturen gibt es in Deutschland die ISO19902 als eine der bisher sehr wenigen Normen. Hier sind zustandsbasierte Inspektionskonzepte bereits Standard.

In Deutschland entwickelt zur Zeit der VDI eine Norm (VDI 4551), die zum Ziel hat, die Anforderungen an Strukturmonitoring Systemen von Offshore-Windenergieanlagen zu definieren und die darüber hinaus insbesondere die Einbindung von SHM Systemen in die Wiederkehrenden Prüfungen beschreiben soll. Dies geschieht auf Anregung von und in Zusammenarbeit mit dem BSH.

Zur Zeit wird der BSH Standard ‚Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen‘ überarbeitet. Wir erwarten in dieser Überarbeitung eine explizite Erwähnung der Möglichkeit, zustandsbasierte Inspektionskonzepte umzusetzen.

2. Offshore Foundation Monitoring – typische Ausgestaltung momentaner Projekte

In Deutschland ist die Installation eines Condition Monitoring Systems für die Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen zwar vorgeschrieben, die Ausgestaltung desselben bleibt aber dem Betreiber überlassen.

Die Betreiber bemühen sich, ein einheitliches Condition Monitoring Systems für alle Windparks in ihrem Portfolio zu entwickeln. Da die Offshore-Windenergienutzung noch sehr jung ist und es insbesondere zur Auswertung der Messdaten von Offshore-Gründungsüberwachungen noch sehr wenig Erfahrung gibt, stehen diese Bemühungen aber oft noch am Anfang.

Einen der ersten Deutschen Windparks mit umfassender Messtechnik für die Überwachung von Gründungen stellt der Windpark „alpha ventus“ dar. Dort wurden und werden durch mehrere Forschungseinrichtungen eine Vielzahl von Fragestellungen zu den Gründungsstrukturen untersucht. Aufgrund des stark wissenschaftlich geprägten Charakters

der Fragestellungen lassen sich die angewendeten Methoden aber nicht ohne weiteres auf kommerzielle Windpark Projekte übertragen.

In der Praxis ist die Ausgestaltung der messtechnischen Systeme in den verschiedenen Projekten noch sehr unterschiedlich. Dies betrifft Art und Umfang der Sensorik, aber auch die Zielstellung der verwendeten Konzepte zur Datenauswertung sowie die grundsätzliche Fragestellung, in welchem Umfang ein Offshore Projekt überhaupt messtechnisch begleitet werden soll.

Einige Messgrößen, die in unterschiedlichen Kombinationen in verschiedenen Projekten überwacht werden, sind:

- Kolkbildung am Meeresboden
- Bewegungen der Grout-Fugen
- Neigung des Bauwerks
- Lasteintrag und Materialspannungen
- Beschleunigungen
- Metocean Daten
- Korrosion
- Bildung von giftigen oder explosiven Gasmischungen im Inneren der Gründungsstrukturen

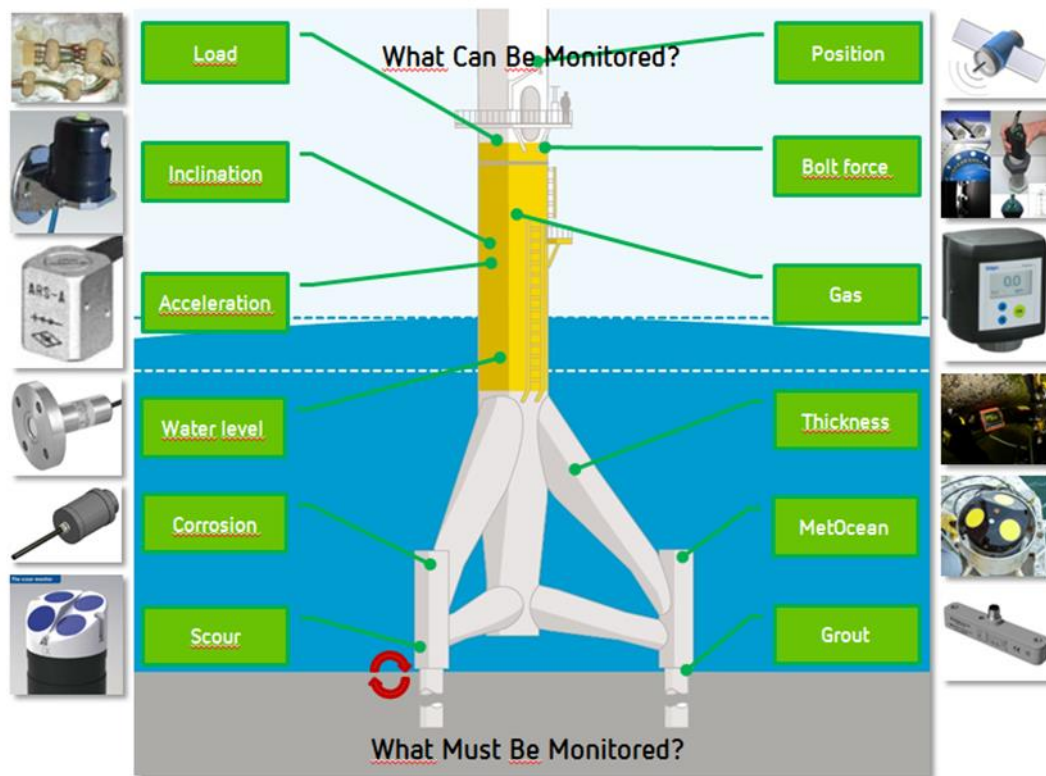


Abbildung 1: Übersicht über typische Sensorik

Zur Auswertung der Messergebnisse bleiben die meisten der derzeit realisierten Konzepte zur messtechnischen Überwachung von Offshore-Gründungsstrukturen vergleichsweise vage. Darüber hinaus verfolgen die meisten Konzepte keinen globalen, sondern einen ‚Hotspot‘ Ansatz. Das heißt, Sensoren werden an vorher bestimmten ‚schwächsten‘ Punkten der Struktur angebracht und überwachen dort sehr spezifisch das lokale Verhalten der Struktur. Dies kann zum Beispiel die Lasteinleitung an einer bestimmten Flanschverbindung sein oder die auftretenden Bewegungen an bzw. in einer Grout-Fuge. Die zugehörigen Auswertungen der Hotspot Messungen können vergleichsweise einfach durchgeführt werden. So wird zum Beispiel die Bewegung der Grout-Fuge einfach den zulässigen Maximalwerten des Bauteildesigns gegenüber gestellt. Hotspot Messungen haben in diesem Sinne den Vorteil, dass die Auswertung der erfassten Messdaten einfach gehalten werden kann und plausibel dargestellt werden können. Nachteilig ist, dass vergleichsweise viele Sensoren benötigt werden (für jeden Hotspot einen Sensor) und das unter Umständen Aussagen zum Gesamtverhalten des Bauwerks, z.B. die Bauwerksermüdung- vernachlässigt werden und nur eingeschränkt getroffen werden können.

Eine Einbindung von Strukturmonitoring Systemen in das Inspektionskonzept wurde an deutschen offshore Strukturen bisher erst vereinzelt durchgeführt.

Zusammenfassend lässt sich über den derzeitigen Stand der Realisierungen von Foundation Monitoring Konzepten sagen:

- Kein einheitlicher Standard, die realisierten Lösungen sind sehr heterogen.
- unterschiedliche Anforderungen an die Sensorik / Meßparameter
- Anforderungen an die Zugänglichkeit der Messpunkte bleibt unberücksichtigt, daraus resultieren zum Teil hohe Realisierungs- und Betriebskosten
- Eindeutige Definition der Zielstellung zur Datenauswertung bleibt häufig unberücksichtigt.
- Die Einbindung in Inspektionskonzepte ist noch nicht selbstverständlich

3. Beschreibung eines modellbasierten Globalen Monitoring Konzeptes

Im Folgenden wird der Ansatz eines Foundation Monitoring System beschrieben, das klare Aussagen zum beobachteten Tragwerk liefern kann und dessen Key Performance Indikatoren in die Entscheidungsprozesse des Betriebsmanagement eingebunden werden können und somit eine Entscheidungsgrundlage für das Management bilden. Auch soll die Zahl der eingesetzten Sensorik wesentlich reduziert und somit die Kosten eines Monitoring Systems verringern werden. Der erste wesentliche Schritt besteht in der Definition der Anforderungen, die an ein Monitoring System gestellt werden.

3.1 Definition der Ziele

Bei Offshore Gründungsstrukturen handelt es sich in aller Regel um robuste Strukturen. Das Bauwerksmanagement von Offshore-Strukturen erfordert akkurate Information zur Entscheidungsfindung. Weiter gilt für Offshore-Strukturen in der Regel:

1. Erschwerter Zugang: Die Bauwerke liegen weit vor der Küste und sind die meiste Zeit schwer oder gar nicht zu erreichen.
2. Kurze Lebensdauer: Sie wurden für eine Lebensdauer von 20 oder 25 Jahren ausgelegt.
3. Es gelten spezifische Entwurfsrichtlinien:

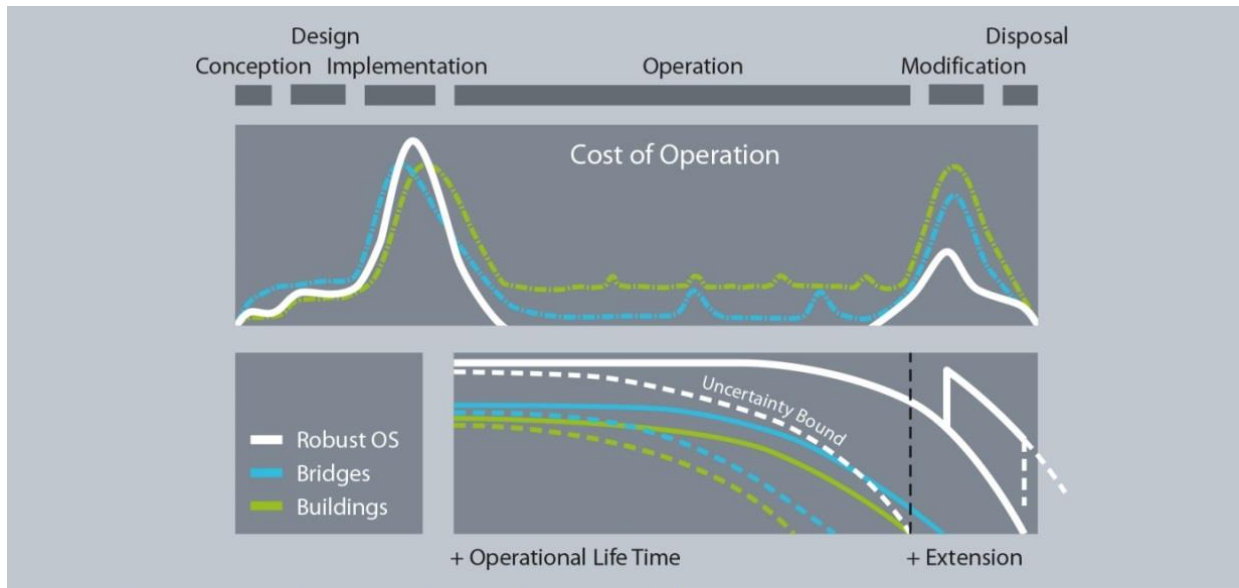
Oft lassen sich die Ziele dann bei genauer Betrachtung eines SHM auf folgende Punkte reduzieren:

- Das Monitoring System muss online Daten für die Lebenszyklus- und die Zustandsprognose des Bauwerks zu liefern. Die Information muss zur Unterstützung der Entscheidungsprozesse zu diesen Themen geeignet sein.
- Das Monitoring System muss zuverlässig und wartungsarm auf unbemannten Plattformen laufen. Hier ist ausreichend Redundanz bei den wichtigsten Komponenten zu schaffen.
- Es sollen periodische Auswertungen/Berichte, z.B. jährlich, erstellt werden. Sie müssen einen Zustandsindex des Bauwerks enthalten, sowie Aussagen über die erwartete Restlebenszeit, die bereits erfahrenen Lastwechsel und eventuelle Veränderungen in den Randbedingungen des Bauwerks (z.B. im Boden) zulassen
- Die Berichte müssen einfach verständlich aufgebaut sein.
- Auf Entscheidungsebene ist eine Darstellung im bewährten, einfach verständlichen Ampelstil Online und Real-Time vorzuziehen. Detaillierte Informationen über die Indices und die Beiträge einzelner Indikatoren sind in einem separaten Report festzuhalten.
- Das Monitoring soll sich auf die beiden wesentlichen Aufgabenstellungen, nämlich die Traglast und das Ermüdungsverhalten konzentrieren.
- Die vorherrschenden Umweltbedingungen sind in jedem Fall unabhängig zu ermitteln und in das System zu integrieren, um deren Einfluss auf die Ergebnisse herausrechnen zu können.

3.2 Theorie / Methodologie

Global monitoring rather than local monitoring

Beim klassischen Bauwerksmonitoring, dem SHM (Structural Health Monitoring), konzentriert man sich auf die Schadenserkenkung auf vier klassischen Niveaus (Erkennung-Lokalisierung-Quantifizierung-Prognose). Anders als klassische Bauwerke, werden Offshore-Bauwerke als robuste Strukturen so geplant, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Schäden auftreten.



→ Total Costs and Life Time

Abbildung 2: Total Costs and Lifetime of a structure

Die Graphik zeigt die 6 typischen Abschnitte im Lebenszyklus eines Bauwerks. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass Offshore-Bauwerke während des Betriebs ohne Bauwerksanierung auskommen sollen. Dies wird durch ein entsprechendes Überdesign erzielt.

Offshore-Strukturen werden unter besonders gut überwachten Bedingungen produziert und sind zu einem hohen Grad Qualitätstests unterworfen. Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit des Versagens auf ein sehr geringes Maß. Unter normalen Umständen kann erwartet werden, dass sich keine negativen Veränderungen in der Struktur ergeben.

Diese Philosophie ist auch im Degradationskonzept abgebildet. Das Design erfolgt für die gewünschte Lebensdauer. Die Unsicherheiten können sich in beide Richtungen auswirken. Beim Offshore-Design versucht man für die geplante -relativ kurze- Lebensdauer, diese auch für ungünstige Unsicherheitsannahmen garantieren zu können.

Für die Monitoring-Strategie wählen wir daher ein globales Verfahren. Dies ist erfolgsversprechender als die Beobachtung, wie sich lokale Phänomene verhalten

Das Monitoring im hier vorgeschlagenen Konzept konzentriert sich daher auf Veränderungen der **Systemantwort**. Diese beschreibt zuverlässig, wie das Tragwerk mit den tatsächlich vorhandenen Belastungen umgeht.

Die Änderung der Systemantwort über die Zeit (i.e. Degradation) wird durch standardisierte Gesetze beschrieben. Das Monitoring bestimmt den aktuellen Status auf der Lebenszeitkurve und warnt im Falle einer Abweichung vom prognostizierten Verhalten. Zur Feststellung der Systemantwort bietet sich das AVM (Ambient Vibration Monitoring) an. Die Methodik ist bereits voll entwickelt und wird weltweit flächendeckend eingesetzt. Die entsprechenden Grundlagen sind in der beiliegenden Literaturliste enthalten.

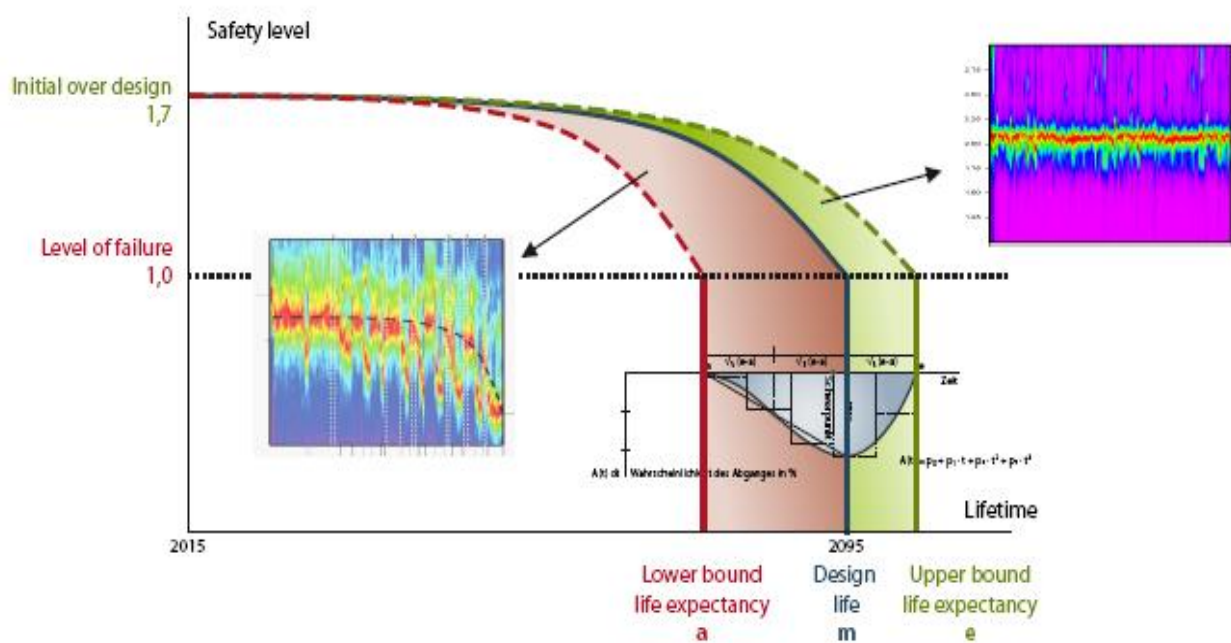


Abbildung 3: Degradationskurve

Die in der Abbildung gezeigte Degradationskurve stellt eine mathematische Formulierung der theoretischen Abnahme des Widerstands einer Struktur dar. Der Zustandsindex, welcher aus den Monitoring-Daten abgeleitet wird, ergibt einen Punkt in der Zeit, welcher direkt mit der theoretischen Kurve verglichen werden kann. Die Unsicherheiten zu diesem Index sind konsiderabel niedriger als die Unsicherheiten, welche in Durchschnittsfällen anzusetzen wären.

Im praktischen Fall führt man Messungen durch, die die Funktionalität zum Beispiel der Grout-Verbindung beschreiben, anstatt Spannungen, Dehnungen oder Bewegungen in der Grout-Fuge zu messen. Die Vorteile dabei sind:

- Das Erfordernis einer geringen Anzahl von Sensoren
- Diese können an gut zugänglichen Plätzen über der Wasserlinie angebracht werden
- Erhebliche Kosteneinsparungen bei der Installation, dem Betrieb und der Wartung

Systemidentifikation

Theoretische Berechnungsmodelle, welche für die Bestimmung von Spannungen, Dehnungen und Verformungen herangezogen werden, repräsentieren nur eine Annäherung an die Realität, welche durch ein Systemmonitoring kalibriert werden können. Durch Systemidentifikation wird angestrebt, dass Realität und Simulation möglichst gut übereinstimmen.

Die durch Ambient Vibration Monitoring bestimmte Systemantwort einer Struktur kann nicht nur für den einfachen Zweck des Updatings benutzt werden, sondern liefert auch Statements über die chronologische Entwicklung des Zustands des Bauwerks. Dadurch werden Abschätzungen der vorhandenen Restlebensdauer ermöglicht. Die Messungen stellen aktuelle Zustandsbeurteilungen dar und können in Kombination mit parallel durchgeführten mathematischen Analysen das Detektieren von Schäden ermöglichen.

Das Online Monitoring-System beobachtet mehrere Bauwerksparameter, welche als Key Performance Parameter bezeichnet werden. Diese sind:

- **Frequenzanalyse:** Die Verschiebung von Frequenzen zeigt Änderungen in der Steifigkeit und damit eventuelle Schäden an. Zudem wird analysiert wie sich die Amplituden über die Zeit verändern und die entsprechenden Dämpfungsfaktoren werden bestimmt.
- **Eigenformen:** Eigenformen ändern sich schnell, wenn Schäden eintreten oder eine Änderung in der Performance merkbar ist. Hier dient die modale Krümmung oder Änderung in der Form als Indikator.
- **Vibrationsintensität:** Die schädigende Wirkung der Einwirkungen auf das Tragwerk wird bewertet. Dies ergibt einen direkten Hinweis auf die dynamische Belastung und damit der zu erwartenden Lebensdauer.
- **Energieumwandlung:** An Lagern, Fugen, Übergangskonstruktionen und anderen Bauteilen wird Energie umgewandelt. Falls dies an Stellen geschieht, die nicht dafür vorgesehen sind, ist das ein Hinweis auf eine Schädigung.
- **Trend der Eigenfrequenzen:** Die Eigenfrequenzen ändern sich über die Zeit. Durch die „Accumulated Energy Function“, welche die Verschiebung der Energie von niedrigeren zu höheren Frequenzen beschreibt, ist ein direkter Zugang zur Alterung zu finden.
- **Räumlicher Trend:** Die Unterschiede im Umgang mit der eingebrachten Energie können dazu verwendet werden, Schwachstellen innerhalb der Tragwerke aufzufinden.

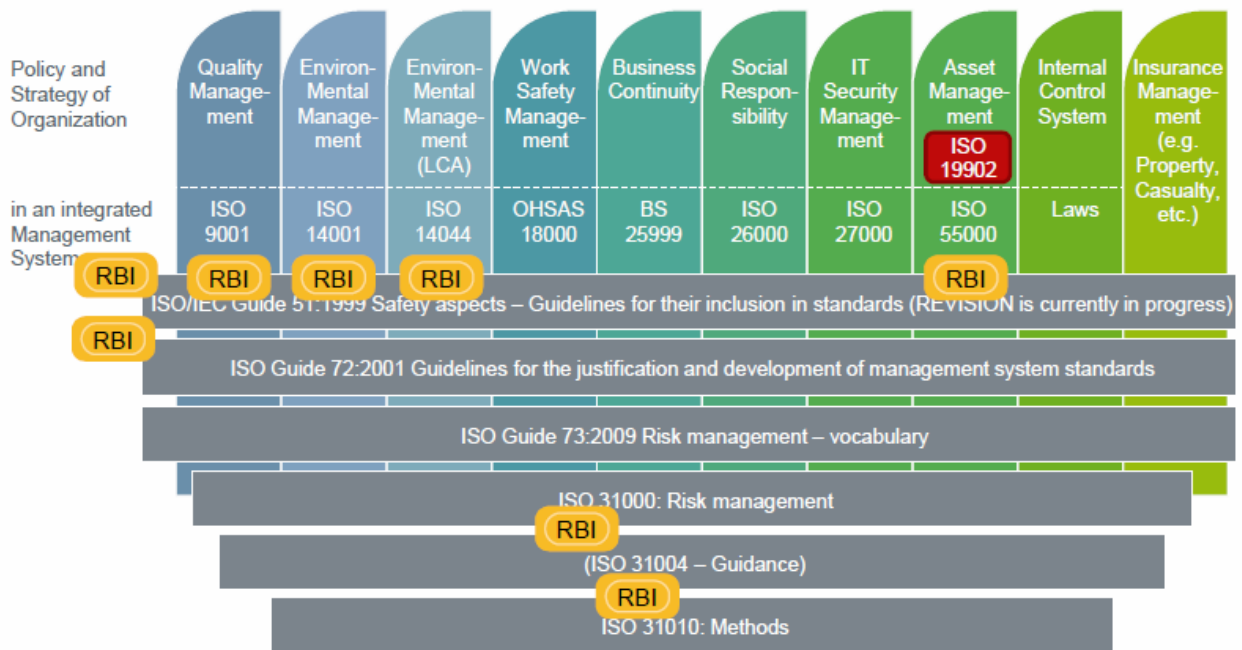
Bei der Auswertung der Monitoring Daten in Informationen werden alle diese Indikatoren zur Systemidentifikation benutzt. Zusätzlich werden statistische Methoden eingesetzt, um Trends aus den großen Datenmengen zu extrahieren. Die Anwendung von Trendkarten, welche auf

einen Blick eventuelle Änderungen individueller Parameter erkennen lassen, hat sich dabei sehr bewährt.

3.3 Risikomanagement und Einbindung in Inspektionskonzepte

Die Einbindung von SHM in Inspektionskonzepte kann nur gelingen, wenn man sich in den Prinzipien, Konzepten und der Terminologie in Bezug auf Bauwerke, Bauwerksmanagement und Bauwerksmanagementsystemen auf die ISO 55000 (Asset Management – Overview, Principles and Terminology) und die ISO 31000 (Risk Management – Principles and Guidelines) bezieht.

Die folgende Graphik zeigt die Einbettung von Risk based Inspection (RBI) Konzepten in die Systematik der ISO Normen:



Quelle: SafeLife-X

Abbildung 4: RBI in den ISO Normen

Der hier gemachte Vorschlag folgt direkt dem Risikokzept der ISO 31000 und wird durch zielorientierte Risikopläne ergänzt. Die Teilziele Zusammenhang, Struktur, Betrieb,

Prozesse, Funktionen, Services und spezielle Praktiken werden in diesem Sektor angewandt.

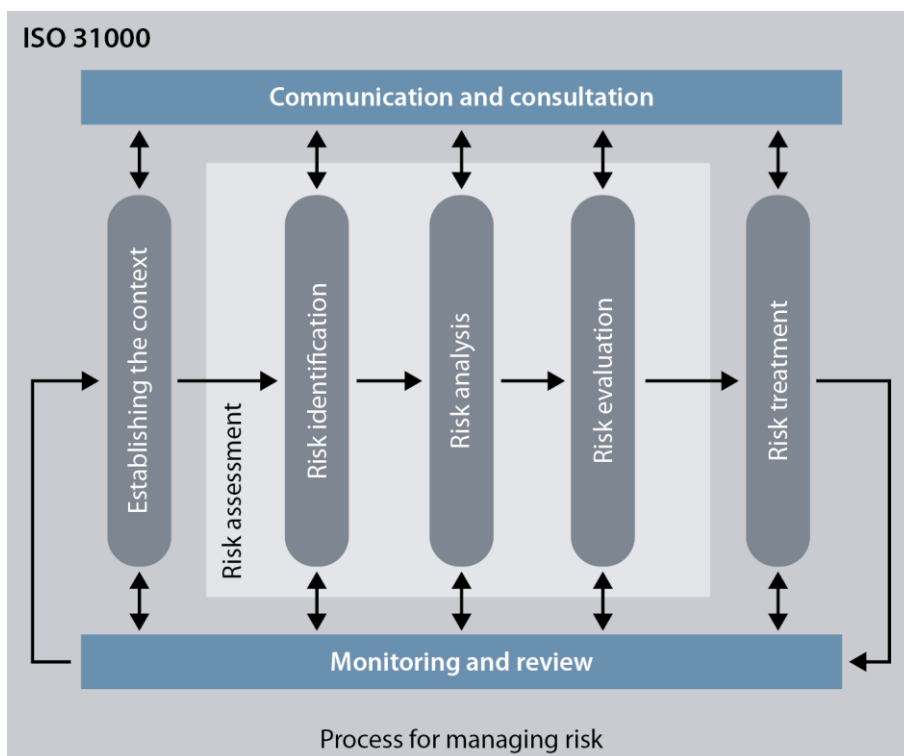


Abbildung 5: Risk Framework nach ISO31000

Die vorgeschlagene Prozedur folgt direkt der Klausel 5 der ISO 31000 in all ihren Aspekten.

Literaturhinweise

- [1] PICHLER, Dieter and WENZEL, Helmut: Ambient Vibration Monitoring. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2005, ISBN 0-470-02430-5.
- [2] WENZEL, Helmut: Health Monitoring of Bridges. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2009, ISBN 978-0-470-03173-5.
- [3] WENZEL, Helmut et al.: Industrial Safety and Life Cycle Engineering. Vienna: GRASL Druck & Neue Medien GmbH, 2013, ISBN 978-3-200-03179-1.
- [4] DIN 1076_1999-11-01_Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen u Wegen Überwachung und Prüfung
- [5] DNV-OS-C401 Fabrication and Testing of Offshore Structures
- [6] DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures
- [7] DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures Section 13 In-service inspection, maintenance and monitoring
- [8] GL Wind 2005 IV-2 Guidelines for the Certification of Offshore Wind Turbines

- [9] GL 2007 Industrial Services Part 6 Offshore Technology
- [10] ISO 31000_2009-05-25_Risk management - Principles and guideline
- [11] ISO 19902, Fixed Steel Offshore Structures, Chapter 24 In-service inspection and structural integrity management.
- [12] NORSOK N-001 Integrity of Offshore Structures
- [13] NORSOK N-001 Structural Design
- [14] NORSOK N-002 Collection of metocean data
- [15] NORSOK N-003 Actions and action effects
- [16] NORSOK N-005 Condition Monitoring of Loadbearing Structures
- [17] NORSOK S-002 Working Environment