

Entwicklung der Richtlinie VDI 4551 "Strukturüberwachung und Beurteilung von Windenergieanlagen und Plattformen"

Y. Petryna, TU Berlin W. Rücker, BAM







Gliederung

- Zusammensetzung und Ziele des VDI-Ausschusses
- Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring, SHM)
- Gliederung der Richtlinie
- Stand der Technik und Herausforderungen
- Ansätze für Strukturüberwachung
- Bespiele
- Zusammenfassung und Ausblick





Zusammensetzung des VDI-Ausschusses

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. W. Rücker, BAM

Vertreter verschiedener Akteure:

- Forschungseinrichtungen (Fraunhofer, Universitäten)
- Betreiber / Eigentümer
- Versicherer
- Zertifizierer
- Dienstleister
- Hersteller

Verschiedene Akteure vertreten verschiedene Interessen.

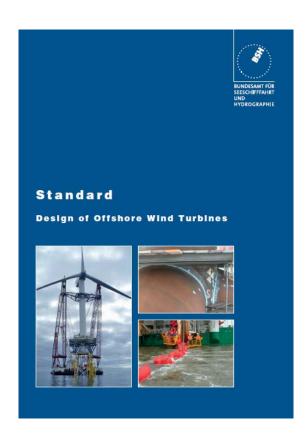
Gemeinsames Ziel: Standardisierung (Handlungsklarheit) schnellere Genehmigung, höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit





Motivation für Strukturüberwachung

- **SHM** für Tragstrukturen (Turm, Gründung, konstruktive Bauteile)
- CMS für Maschinenkomponenten (Rotationsfrequenzen)



Motivation 1 (allgemein):

- Neue Technologie, große Unsicherheiten
- Hohe Reparaturkosten
- Begrenzte Zugänglichkeit und hohe Kosten (offshore: Wetterfenster, Schiffe und Unterwasseraktionen)
- Extreme Ermüdungsbelastung (N ~ 10⁹)
- Aggressive Umgebung

Motivation 2 (spezifisch):

BSH Standard fordert eine WKP alle 4 Jahre (ehemals: ein CMS/SHM für 1/10 der WEA, seit 2015 nicht mehr wegen des kaum messbaren Erfolgs)

VDI 4551 soll den Stand der Technik für SHM definieren, d.h. Beurteilungs-, Bewertungskriterien, Handlungsanleitungen





Potenzieller Nutzen von SHM

- Lastüberwachung und Lebensdauervorhersage
- Design-Überprüfung und Verbesserung
- Technologische Auswirkungen auf Betrieb (Toleranzen, Unsicherheiten, Wechselwirkungen)
- Schadenserkennung, -bewertung und -vorhersage
- Vorausschauende Instandhaltung und Lebensdauermanagement
- Risiko- und Kostenminimierung





Gliederung der Richtlinie

- Anwendungsbereich
- Ziele und Aufgaben
- Tragstrukturen von WEA (Definitionen)
- Verfahren, Grenzzustände, WKP, Referenzgrößen
- Einwirkungen und Beanspruchungen
- Erprobte Verfahren (Stand der Technik)
- Messtechnik
- Wechselwirkung zw. SHM und WKP
- Ergänzende Überwachungsverfahren

(Stand der Forschung, case studies)

Anforderungen an die Dokumentation

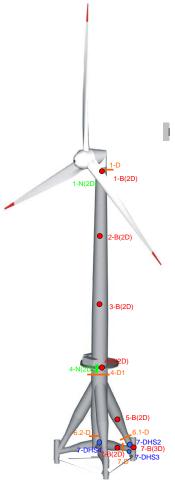
Hinweis: Weitere Vorträge zu diesen Themen im Programm





Herausforderungen von SHM

Typische Fragen zu beantworten:

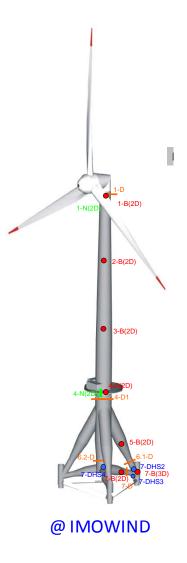


@ IMOWIND

- Lohnt sich ein SHM?
- Ziele?
- Was messen?
- Wo messen?
- Wie messen?
- Datenmanagement (Big data)
- Interpretation der Messdaten (Modelle!)
- Richtige Parameter und Grenzwerte
- Entscheidungsgrundlagen für Betrieb
 - → Bsp.: Effects of defects bei Flugzeugen



Typische Sensorik (Offshore)



Lokale Messungen von:

- Beschleunigung
- Neigung
- Dehnung
- Relative Verschiebung
- Vorspannkraft
- Kolk
- Akustik
- Wasserdruck
- Meteorologische Daten (Betrieb)
- Maschinendaten (Betrieb)



Essentielles: SHM Konzept

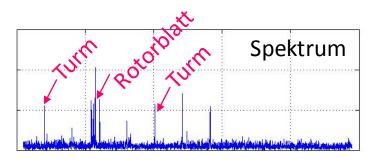
Globale Strategie: Gesamttragwerk

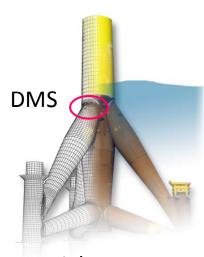


Lokale Strategie: "hot spots"



- Veränderung dynamischer Signatur
- Modelanpassung
- Oftmals: Eigenfrequenzen
- Probleme: niedrige Empfindlichkeit,
 Temperatur-/Umwelteinflüsse









Große Dimension

- Lokale Überwachung von kritischen Stellen (Spannungskonzentration, Schäden)
- Kenntnis von potenziellen Schwachstellen?
- Harte Umweltbedingungen
- Begrenzte Anzahl von Sensoren





Gliederung Erprobte Verfahren

- Einwirkungsermittlung und überprüfung
- Zustandsüberwachung und Design-Überprüfung
- Betriebsüberwachung
- Schadensdetektion und –bewertung
- Prognosemodelle und Lebensdauermanagement
- Optimierung der Anlagensteuerung
- Risikobasierte Inspektionen
- Dokumentation von SHM

Y. Petryna, W. Rücker

- Minimale Konfiguration von SHM
- Verantwortlichkeiten und Qualifikation

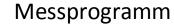




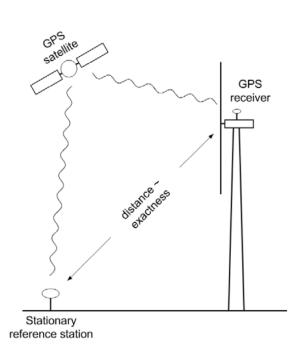
Kombination von globaler und lokaler Überwachung

Konzept

GPS-Technik





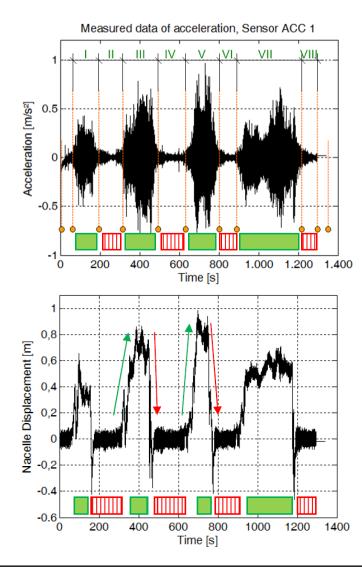


Vergleich von Dehnungen am Turmfuss:

aus gemessener Turmkopfverschiebung + FEM

Y. Petryna, W. Rücker

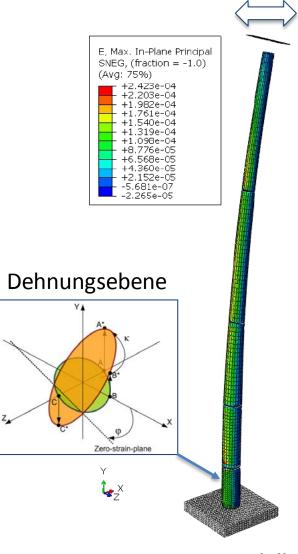
direkt gemessene Dehnungen am Turmfuss



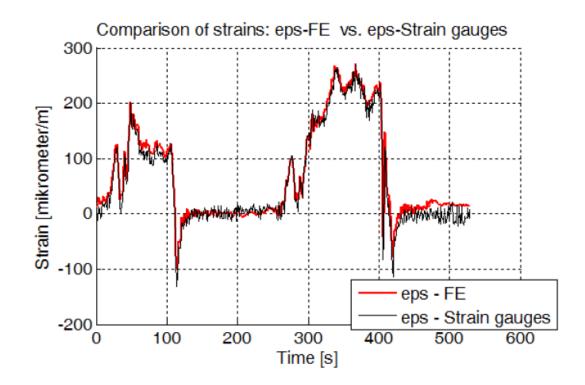




Dehnungsvergleich



Kopfverschiebung (GPS)



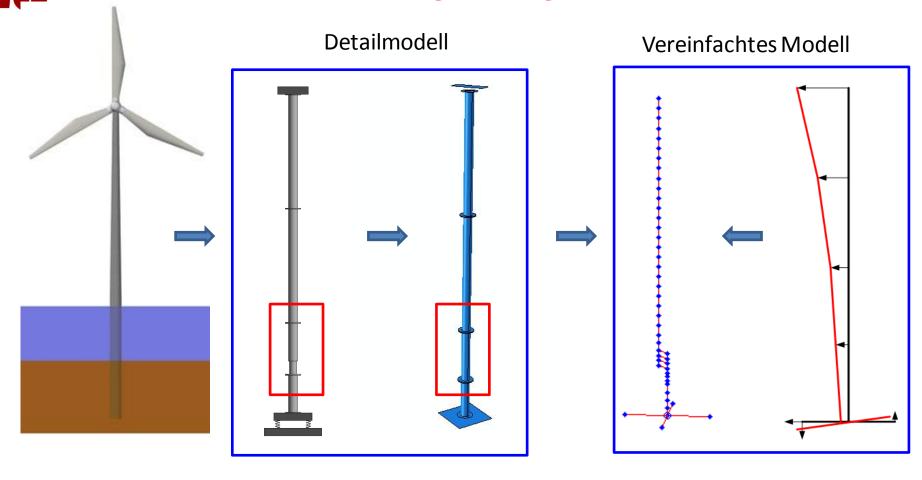
FE-Modell

(Mostböck, 2012)



Dynamik

Modellbildung für Tragstrukturen



Realstruktur

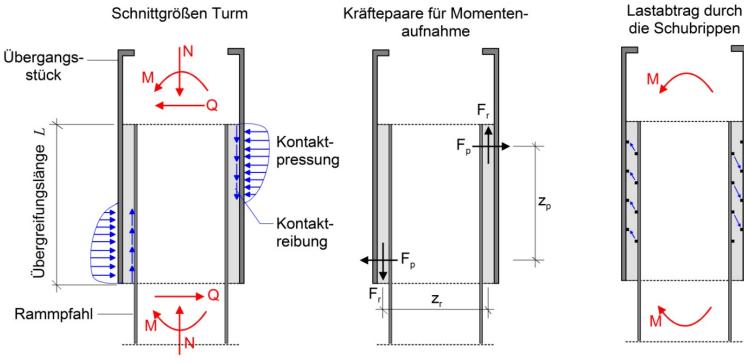
Ersatzstruktur

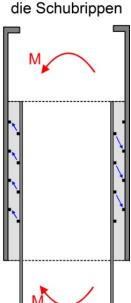
FE Model I: Schalen / Volumen Elemente FE Modell II: Balken / Feder Elemente **Dynamische Messungen**(Physikalische
Größen)





Tragverhalten von Grout-Verbindungen





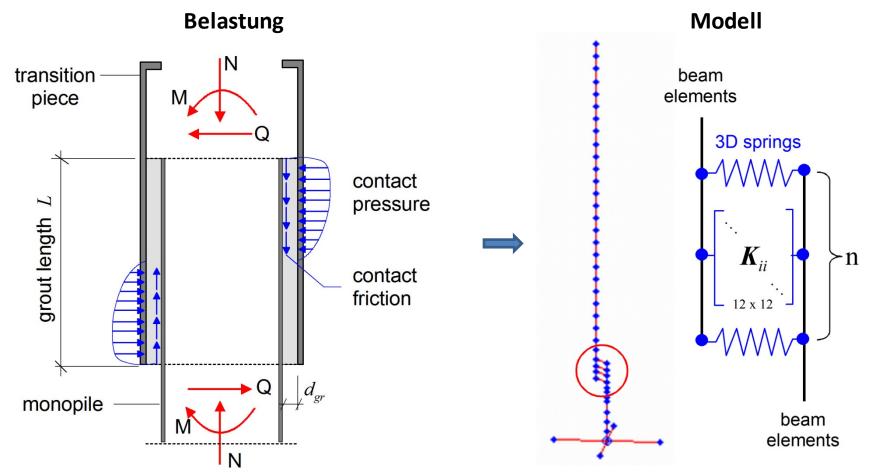
- Komplexe Beanspruchung: Biegung + Normalkraft + Torsion
- Verbindungen ohne und mit Schubrippen ("shear keys")
- Imperfektionen / Herstellung \rightarrow Streuung der Eigenschaften
- Ermittlung der tatsächlichen Traglast ist eine Herausforderung



Schnittgrößen Pfahl

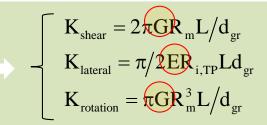


Modellierung der Grout-Verbindung



Trag- und Versagensmechanismen sind nicht umfassend geklärt, deshalb Ersatzfeder

(M. Link, 2011)



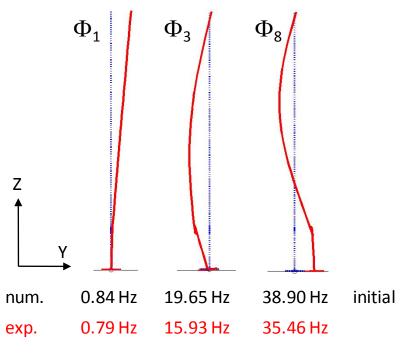


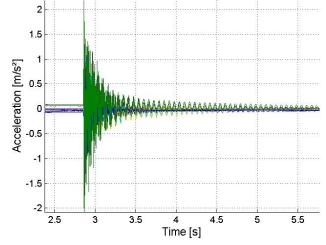
Modalanalyse und Schwingungsmessung

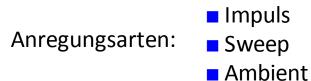


Ausgewählte Schwingungsformen (Matfem)

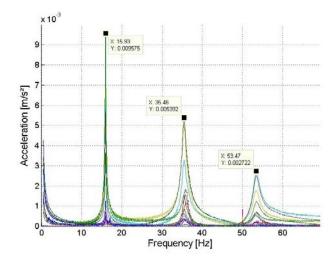








Y. Petryna, W. Rücker





Steifigkeitsidentifikation (Veränderung = Schaden)

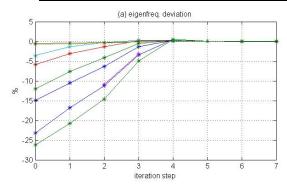


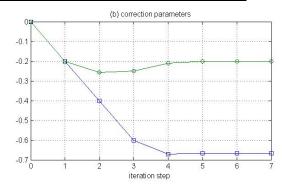
(A. Künzel, 2012)

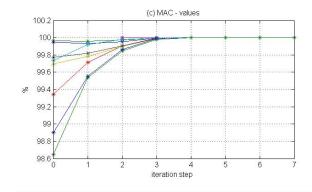
Parametersatz (Beispiel):

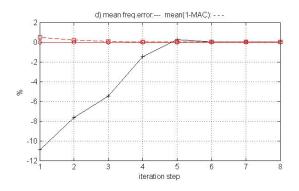
- E-Modul (Groutmaterial) $E_g = 8.3 \text{ MPa}$
- Federsteifigkeit (total) K_s = 3.2 kN/mm
- Biegesteifigkeit (Turm)

<u>Model update (Matfem / Update) – Gradientenmethode</u>





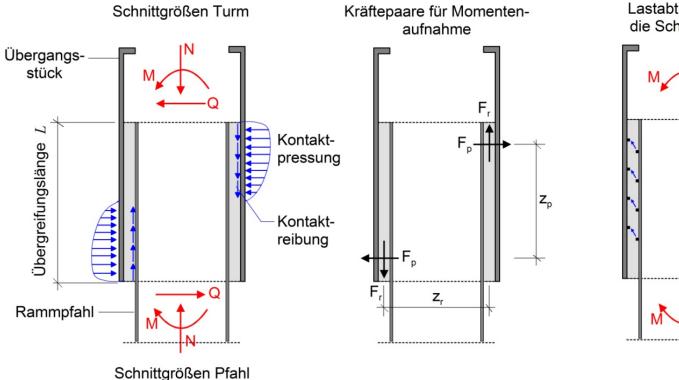




- Dynamische Größen → globale Eigenschaften der Tragstruktur
- schwache Empfindlichkeit gen. lokalen Veränderungen / Schäden



Lokale Modellierung von Versagensmechanismen



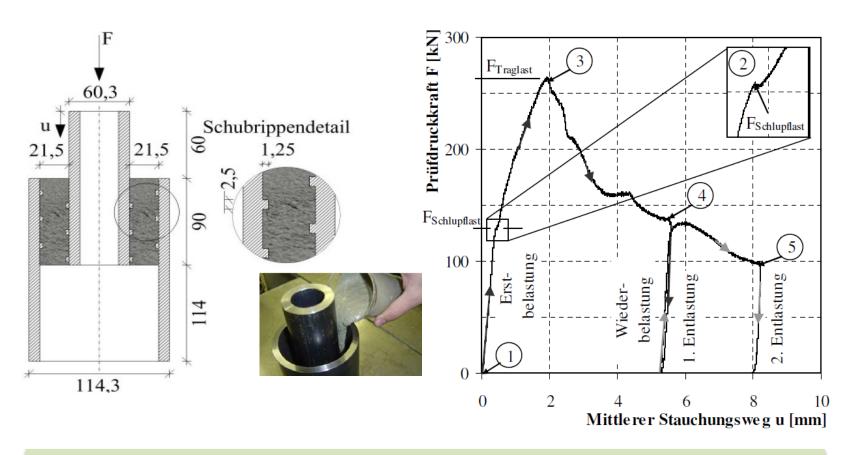
- Lastabtrag durch die Schubrippen
- M N

- Erfordert eine nichtlineare und detaillierte Simulation
- Vorhandene Materialmodelle / Software sind bedingt geeignet
- GL-DNV Empfehlungen sind unzureichend





Axialversuche an der Universität Hannover



- Umfangreiche Axialversuche an Kleinproben mit und ohne Schubrippen
- Unterschiedliche Grout-Materialien, exp. Tragverhalten gut dokumentiert
- Aber: kein direkter Vergleich Experiment-Simulation bis zum Versagen!





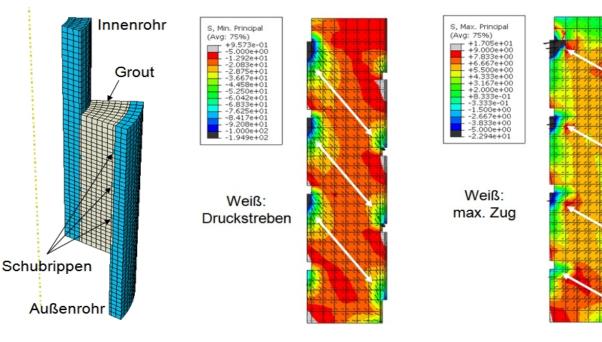


FE-Simulation

Versuch

Schubrippe Druckstrebe Schubrippe

Lineare FE-Simulation



- Qualitativer Vergleich Experiment-Simulation erfolgreich (Kraftübertragung)
- Quantitativer Vergleich ohne richtige Materialparameter schwierig
- Unsicherheiten: Bruchenergie, Haftung, Kontaktreibung, Schwinden, 3D, usw.

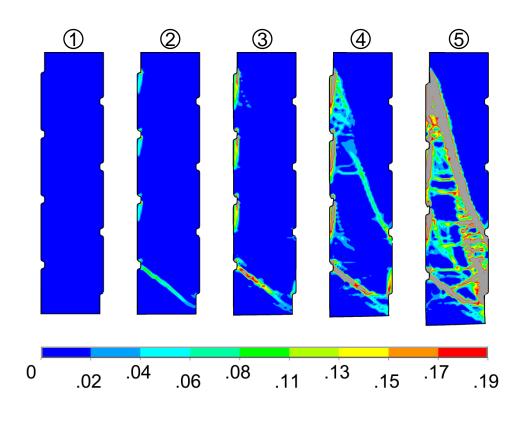
(F. Vogdt, 2012)

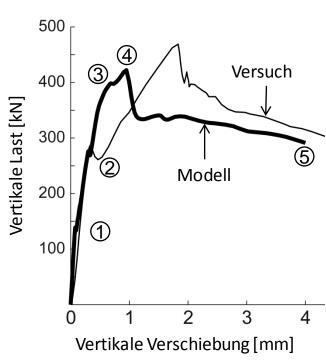




Versagenssimulation und Experiment

FE-Simulation mit einem 3D elasto-plastischen Materialmodell für Beton (ANSYS)





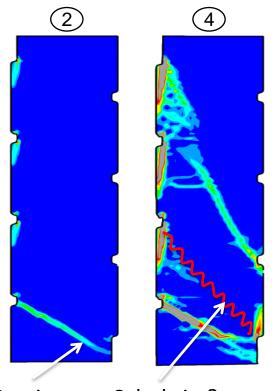
- Traglast akzeptabel
- Qualitativer Verlauf ähnlich
- Steifigkeit überschätzt

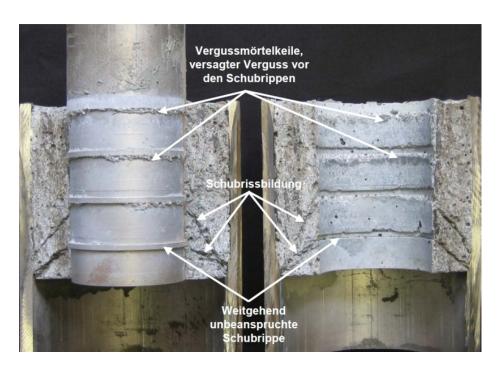




Versagenssimulation und Experiment

Vergleich der Bruchfigur (Tragverhalten und Versagen)





Zugriss Schubriss?

Bruchbild nach Anders 2007

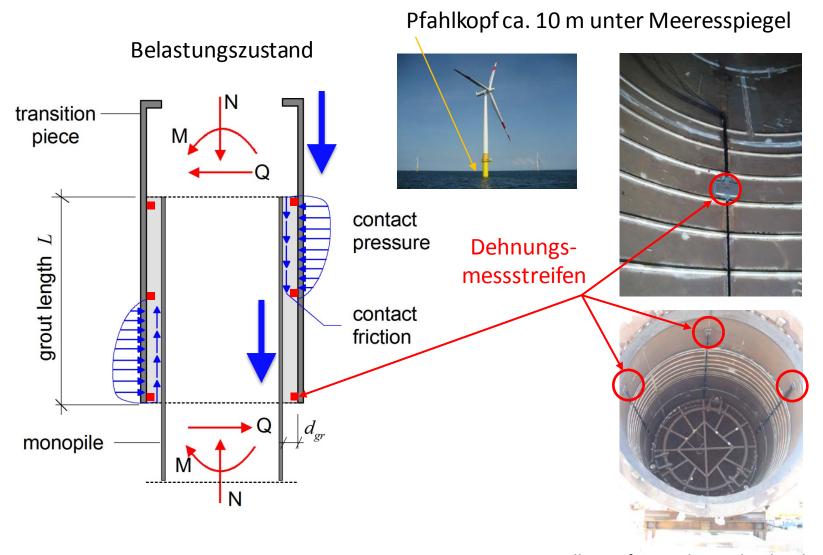
- Entwicklung des Zugrisses in 2 wird gut abgebildet
- Versagensmechanismus (Rissbild in 4) nicht korrekt

Simulation (F. Vogdt, 2014)





Überwachung von Kraftübertragung im Übergangsstück





Quelle: Prof. M. Link, Windpark Baltic 1



Zusammenfassung und Ausblick

- VDI 4551 soll den Stand der Technik definieren
- klare Handlungshinweise enthalten
- Bewertungskriterien, Referenzgrößen, Grenzwerte
- Genehmigung erleichtern
- Zuverlässigkeit erhöhen
- Kosten reduzieren
- gute Voraussetzungen aber auch Herausforderungen





Vorführung am Prüfstand Bladetester



17.03.2016 18.03.2016

um 14.00 in der Peter-Behrens-Halle

Vielen Dank!

