



Strukturüberwachung (SHM) von Offshore-WEA
in Ergänzung zu wiederkehrenden Prüfungen



Schwingungen
Strukturmechanik
Akustik

Wölfel

**Ingenieur-
Dienstleistungen**
Systeme

**90+
Mitarbeiter**

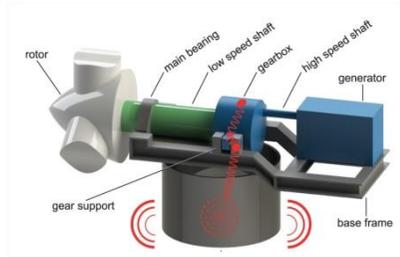
Mess-Systeme Software Ingenieurdienstleistungen
Measurement Systems Software Engineering Services

**für Mittelstand und
Industrie**

**800+
Projekte / Jahr**

in Europa + international

Wölfel Wind Systems



Gliederung

- Motivation und Herausforderungen der Strukturüberwachung (SHM)
- Wölfel Strukturüberwachung (SHM) Philosophie
- Beispiele
- Zusammenfassung

Motivation – Warum Strukturüberwachung



Acoustic inspection of gearbox



Inspection of rotor blade

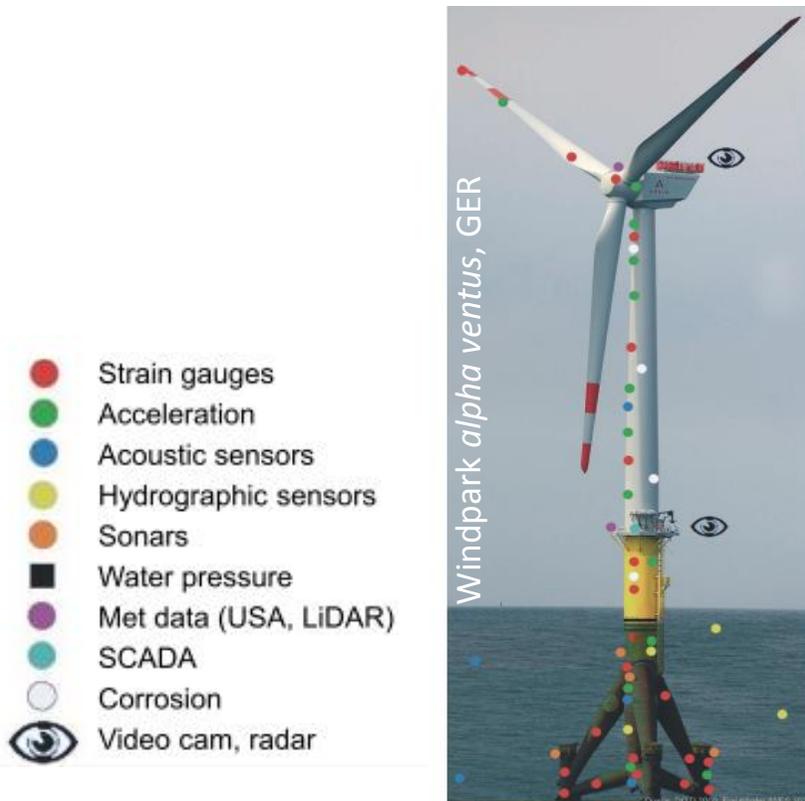


Inspection of jackets

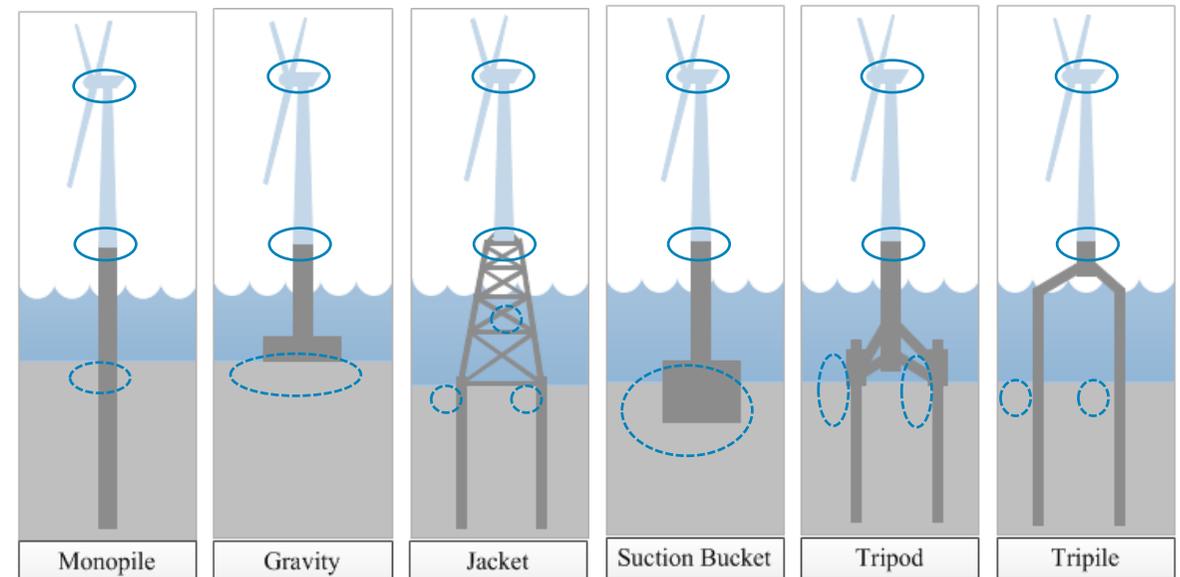


Herausforderungen der Strukturüberwachung

Wissen was möglich ist



Auswahl was wichtig ist



- Robuste Sensorik an ausgesuchten Positionen
- Fokus auf Sensorik über der Wasserlinie
- Datenanalyse

Situation in Deutschland

Derzeit existieren wenige konkrete Vorgaben zur Frage, was Monitoring der Tragstruktur bedeutet:

- Welche Komponenten sind direkt zu überwachen?
 - Welche Messgrößen sind von Interesse? / Welche Sensoren?
 - Welche Anforderungen gelten an die Datenerfassung / Datenspeicherung?
 - Welche Ergebnisgrößen werden für die Erfüllung behördlicher Auflagen benötigt?
 - Welche Nachweise des Designs waren kritisch und sind ins Monitoring zu implementieren?
- jeder Eigentümer / Betreiber muss (darf) eigenes Konzept entwickeln und genehmigen lassen
- ein anerkannter Stand der Technik hierfür ist derzeit noch nicht definiert
- keine allgemein anerkannten und zertifizierten Systeme verfügbar

Ziele der Strukturüberwachung

- Zustandserfassung, Schadensfrüherkennung zur Reduktion von Betriebsausfällen
- Messtechnische Erfassung von realen Beanspruchungen
- Koordinierung und Optimierung von Inspektionsmaßnahmen
- Betriebskostenreduktion durch vorausschauende Planung von Wartungsarbeiten
- Prognose von Schädigungsevolution und Zeitintervallen für sicheren Betrieb und der (Rest-)Lebensdauer
- Verbesserung von Design und wirtschaftliche Bemessung von neuen WEA

Aufgaben der Strukturüberwachung

Erfassen von Lasten / Beanspruchungen

- Ermittlung von Ermüdungsbeanspruchungen (Lastzyklen; Lastkollektive)
- Bewerten von Übertragungsfunktionen (Last-Schnittgrößen-Verformungen)
- Vergleich mit Beanspruchungen aus dem Design
- Klassifikation nach Betriebs- und Umgebungsbedingungen

Zustandsüberwachung

- Ermittlung von dynamischen Eigenschaften (modale Daten)
- Ermittlung von Zustandsparametern (Neigungen, Steifigkeiten, Rissbreiten, etc.)
- Eingangsdaten für zustandsorientierte Instandhaltung
- Anpassung und Validierung von Strukturmodellen
- Detektion, Lokalisation, Quantifizierung, Prognose von Schädigungen

Wölfel Strukturüberwachung (SHM) Philosophie

Messtechnik:

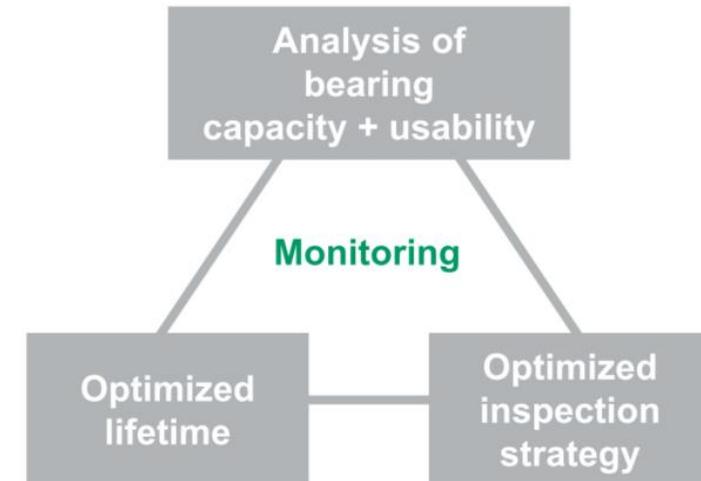
- Robuste und redundante speziell entwickelte Sensorik und Messtechnik
- Modulare Hardware und Daten Analyse
- Direkte Schnittstelle zur WEA Steuerung

FE-Modellierung

- Aufstellung eines mechanischen Modells der Struktur
- Simulation der Strukturodynamik
- Globale Lebensdauerprognose nach relativ kurzer Messdauer

Automatisierte Datenanalyse:

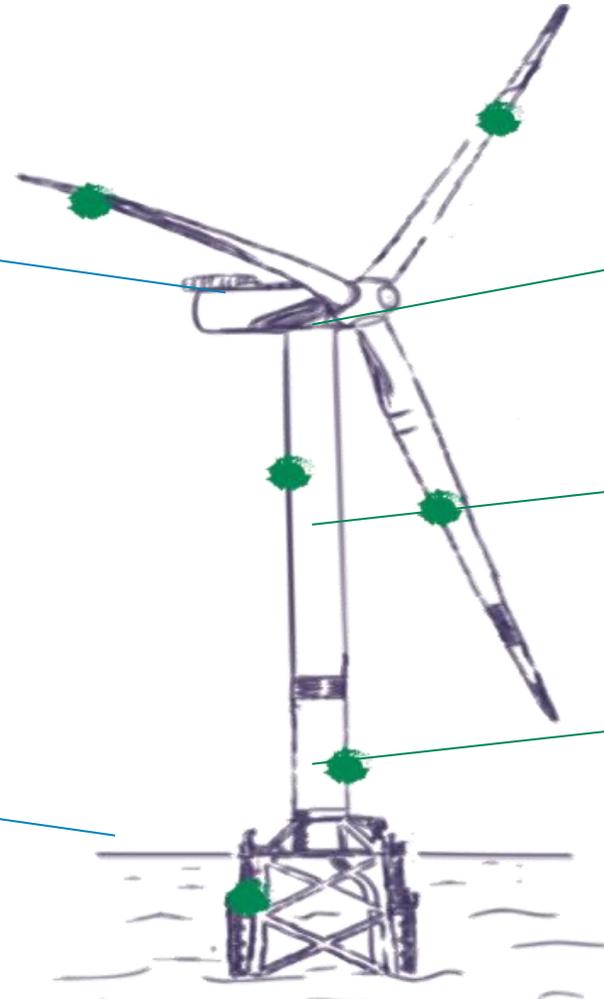
- Patentierte Algorithmen zur Signalanalyse
- Kompensation der Umwelt- und Betriebsbedingungen
- Echtzeitanalyse direkt im Windpark
- Visualisierung der Ergebnisse in einem Onlineportal



Basissystem zur Strukturüberwachung

Wind speed
 Wind direction
 Power
 Rotor speed
 Pitch angle
 Azimuth angle

Wave period
 Wave direction
 Maximum wave height
 Significant wave height



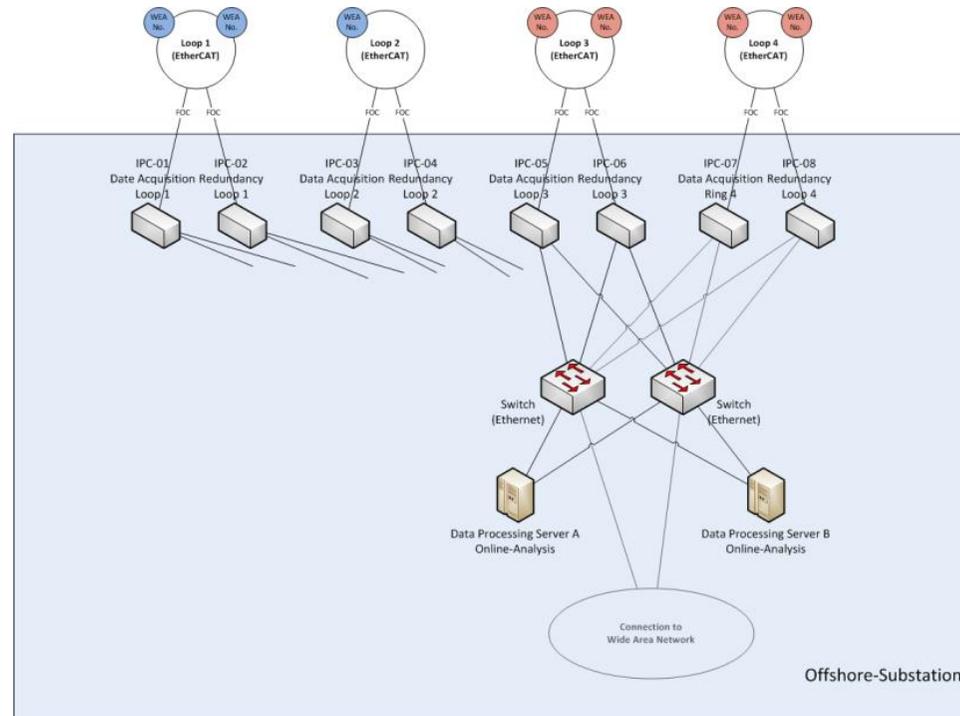
Acceleration
 Inclination

Acceleration

Acceleration
 Inclination
 Strains

Mechanical Model of the structural components for data analysis

Robuste und redundante Hardware



Strukturschaden

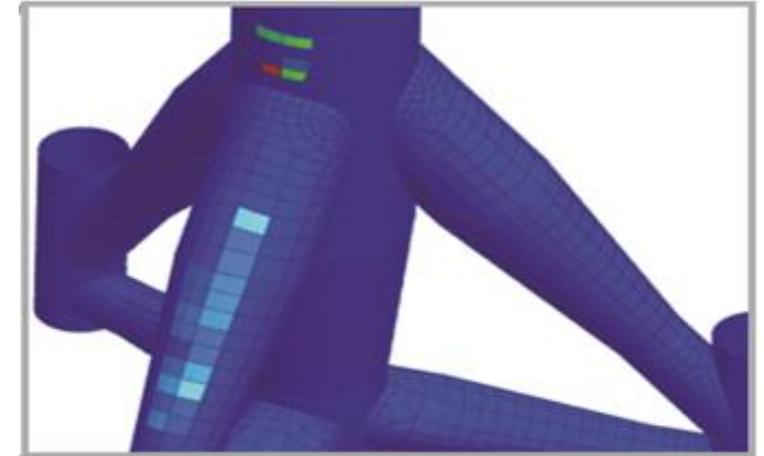
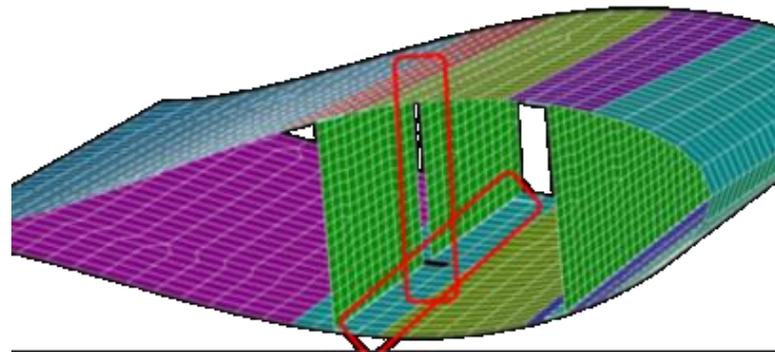
Stufe I
Erkennung

Stufe II
Lokalisierung

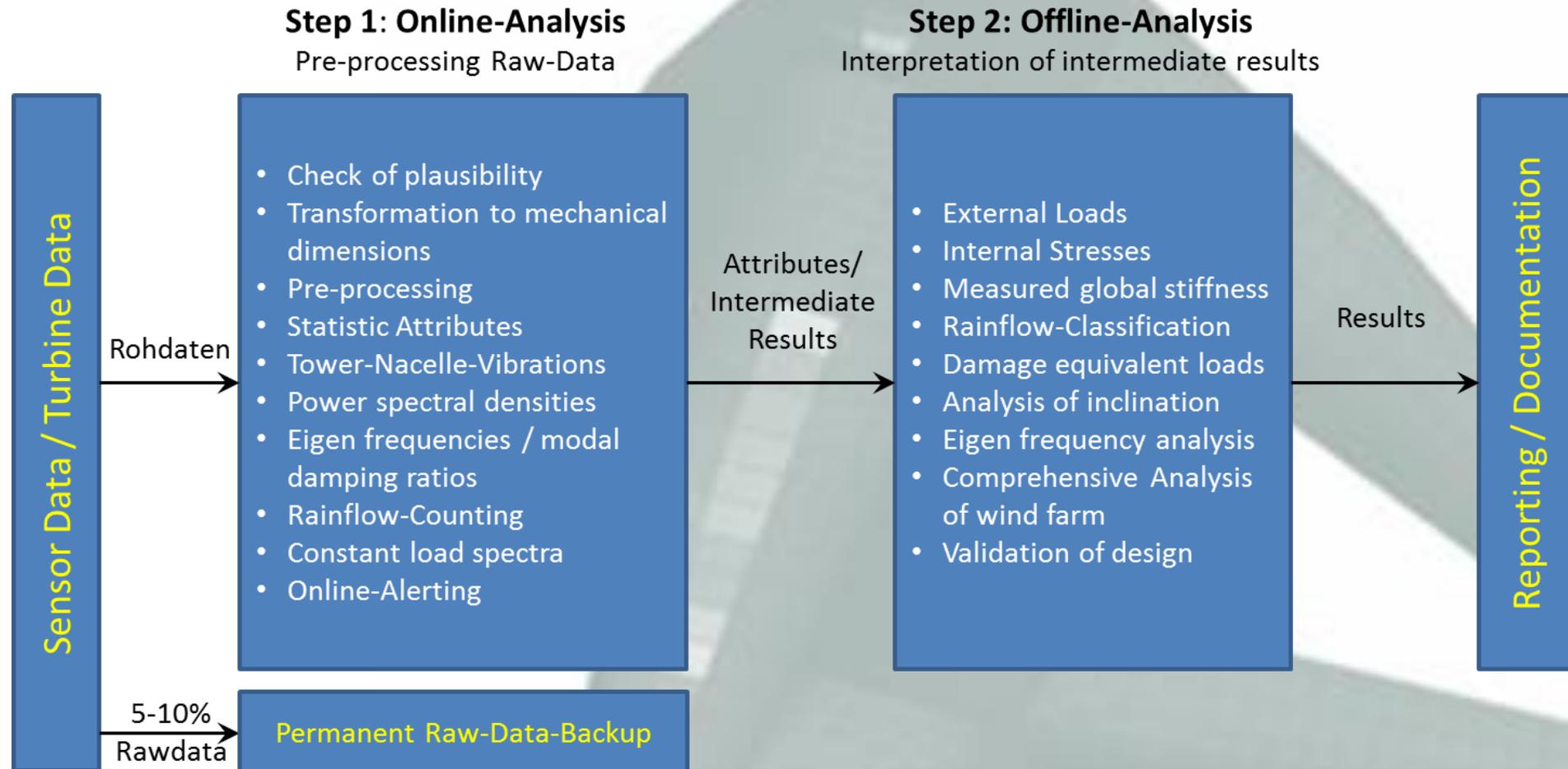
Stufe III
Quantifizierung

Stufe IV
Lebensdaueranalyse

FE – Modellierung für eine genaue Schadenserkennung, Lokalisierung und Lebensdaueranalyse



Online- und Offline Datenanalyse



Web Monitoring

Elemente filtern...
Statistik

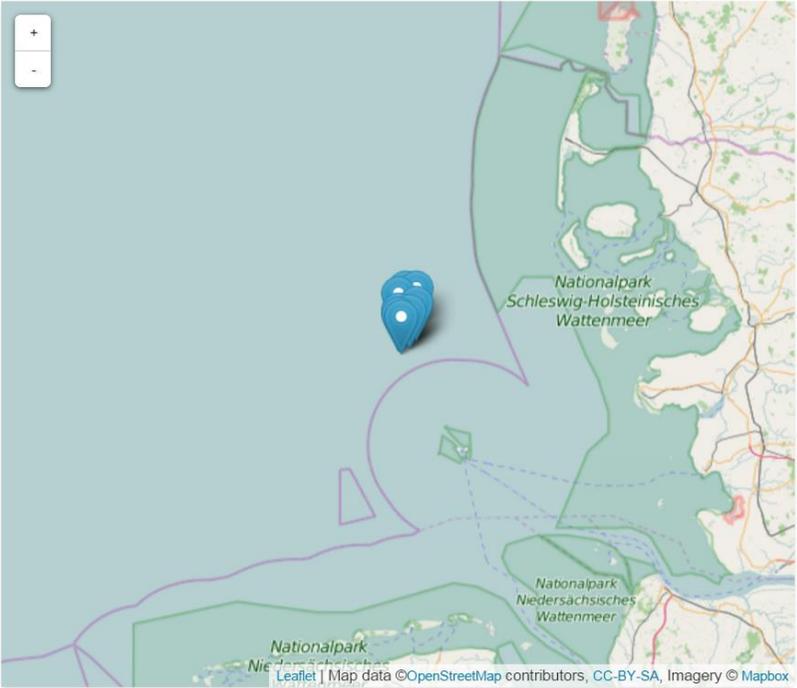
Windenergieanlagen

Elemente filtern...

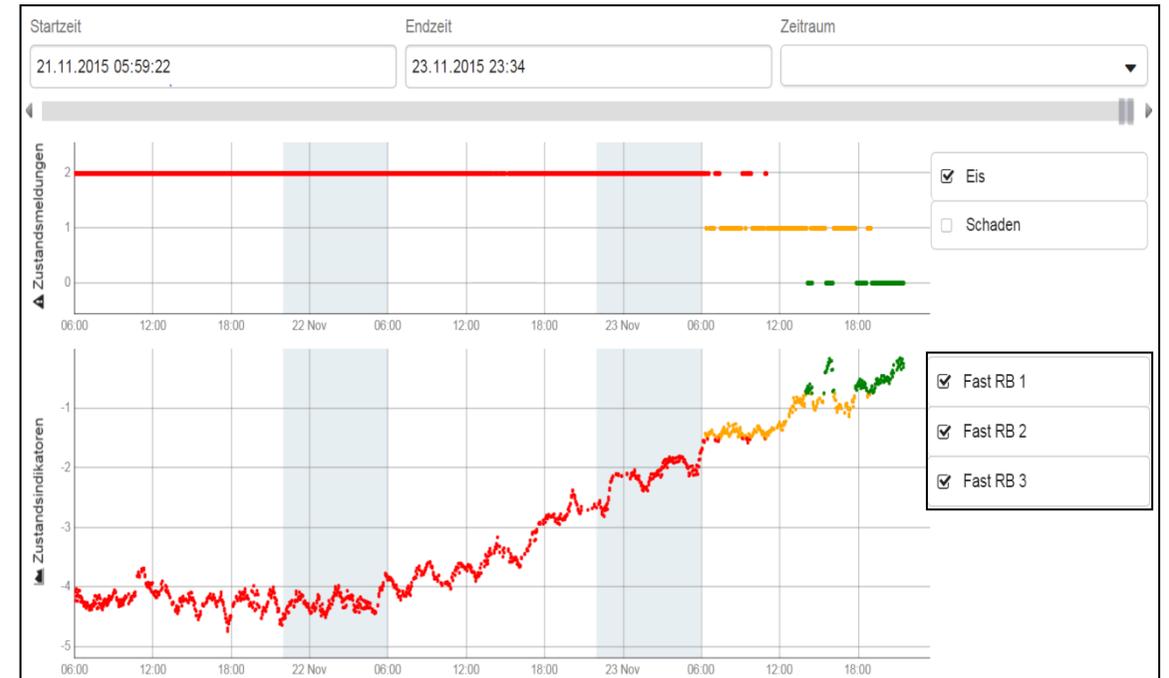
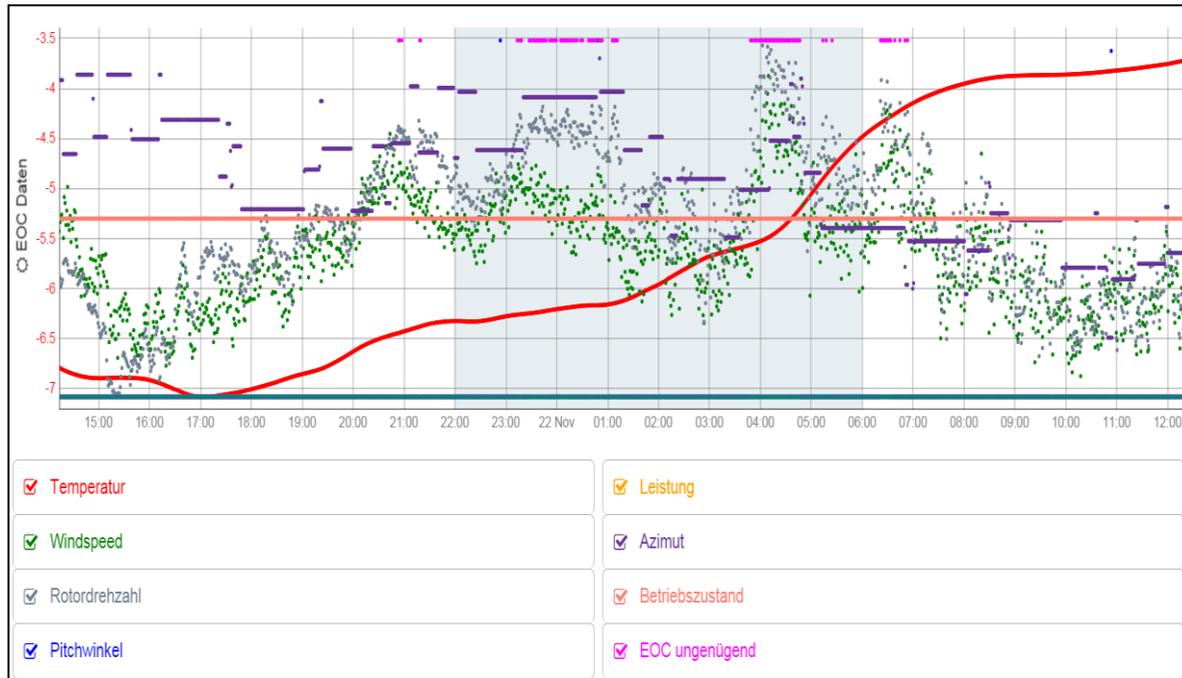
✈ NO-03	System Vereisung Struktur
✈ NO-06	System Vereisung Struktur
✈ NO-10	System Vereisung Struktur

Standort

Seriennummer	NO-45	Windpark	Park 8
Parknummer	NO-45	Breitengrad	54.417409
Systemzustand	OK	Längengrad	7.682578
Rolle	monitoring/windturbine		



Web Monitoring



Beispiele: SHM Auswertung OFW

- Systemüberblick

Auswertungszeitraum
Verfügbarkeit Messkanäle
Anzahl 10 Min. Daten
Systemverfügbarkeit

- Äußere Lasten

Windgeschwindigkeit (m/s) - 95%-GEV-Konfidenzgrenze
Wellenhöhe (m) - 95%-GEV-Konfidenzgrenze

- Neigung ZLZ + Betrieb (Alarmer)

Transitionpiece-Neigung (°) 95%-Konfidenzgrenze
Transitionpiece-Neigung (°) 5%-Konfidenzgrenze
Turmneigung (°) 95%-Konfidenzgrenze
Turmneigung (°) 5%-Konfidenzgrenze

- Steifigkeiten

Steifigkeitsverhältnis in z-Richtung (kNm/°)
Standardabw. Steifigkeitsverh. in z-Richtung (kNm/°)
Steifigkeitsverhältnis in y-Richtung (kNm/°)
Standardabw. Steifigkeitsverh. in y-Richtung (kNm/°)

Beispiel SHM Auswertung Offshore Windpark

- Innere Beanspruchungen

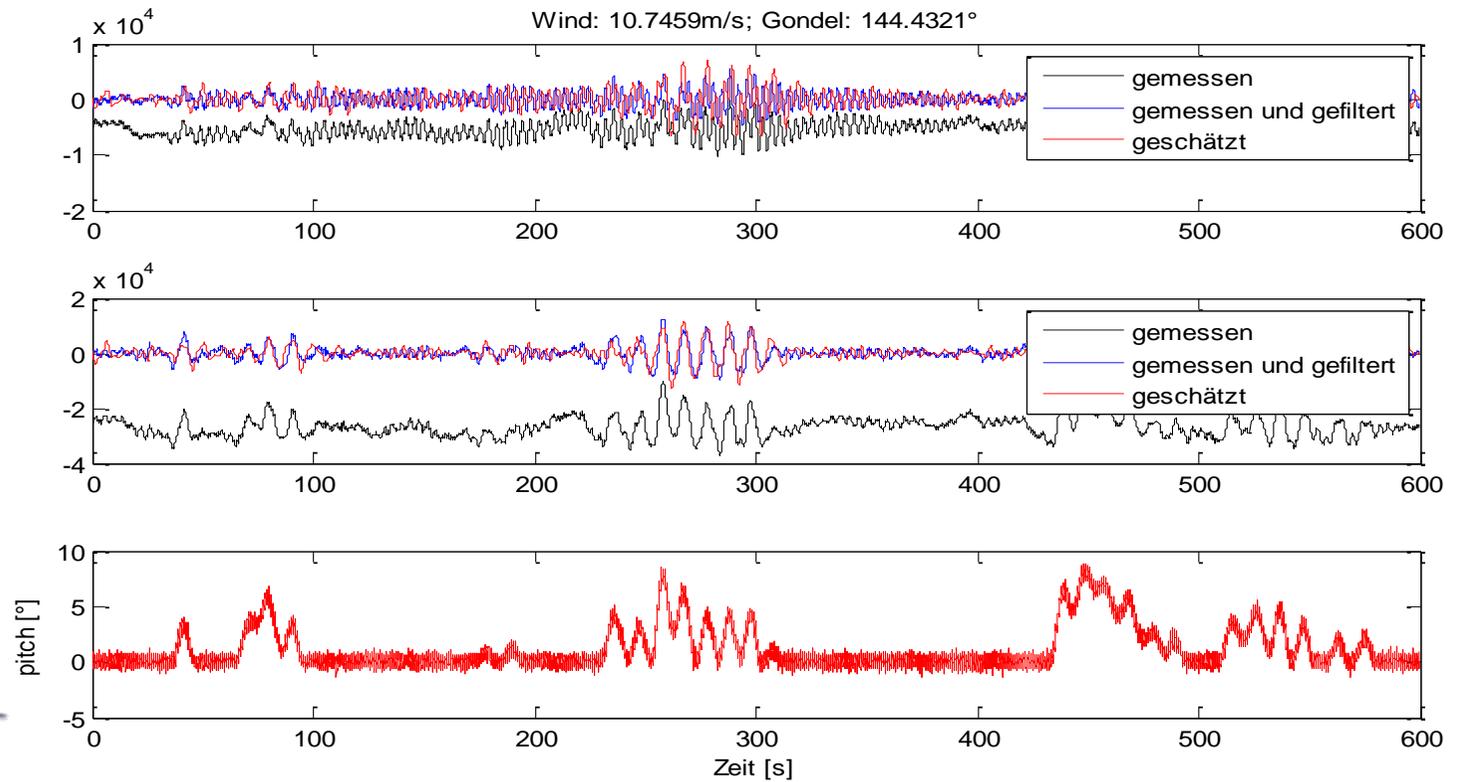
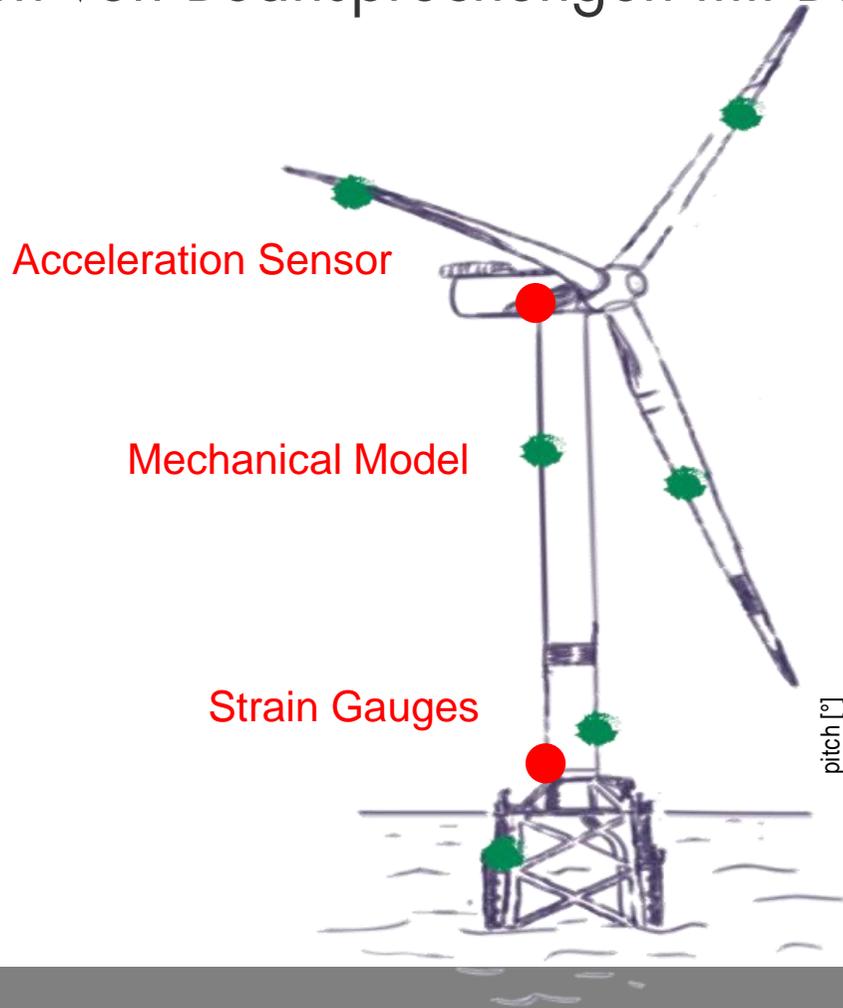
Bezugszeit
Normalkräfte
Turmbiegung (Mby, Mbz)
Turmtorsion (MTx)
Querkräfte (Qy,Qz)
Biegungen Jacket/ Monopile /TP-Bereich (y,Z)

- Turmbiegeeigenfrequenzen

1. Turmbiegeeigenfrequenz längs zu Gondel (Hz)
1. Turmbiegeeigenfrequenz quer zu Gondel (Hz)
2. Turmbiegeeigenfrequenz längs zu Gondel (Hz)
2. Turmbiegeeigenfrequenz quer zu Gondel (Hz)

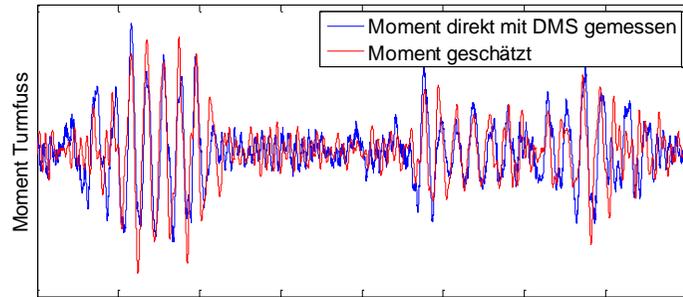
Beispiel:

Erfassen von Beanspruchungen mit Beschleunigungsmessungen



Tower Fatigue Analysis – Acceleration Sensor substitute Strain Gauges

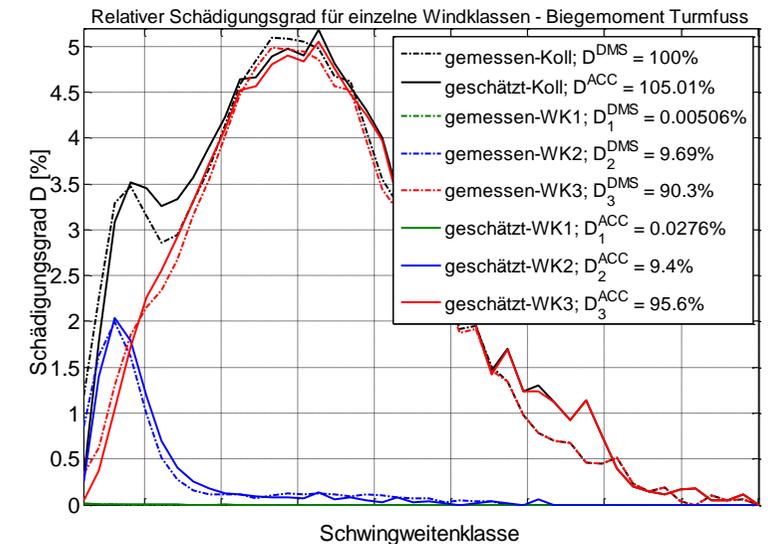
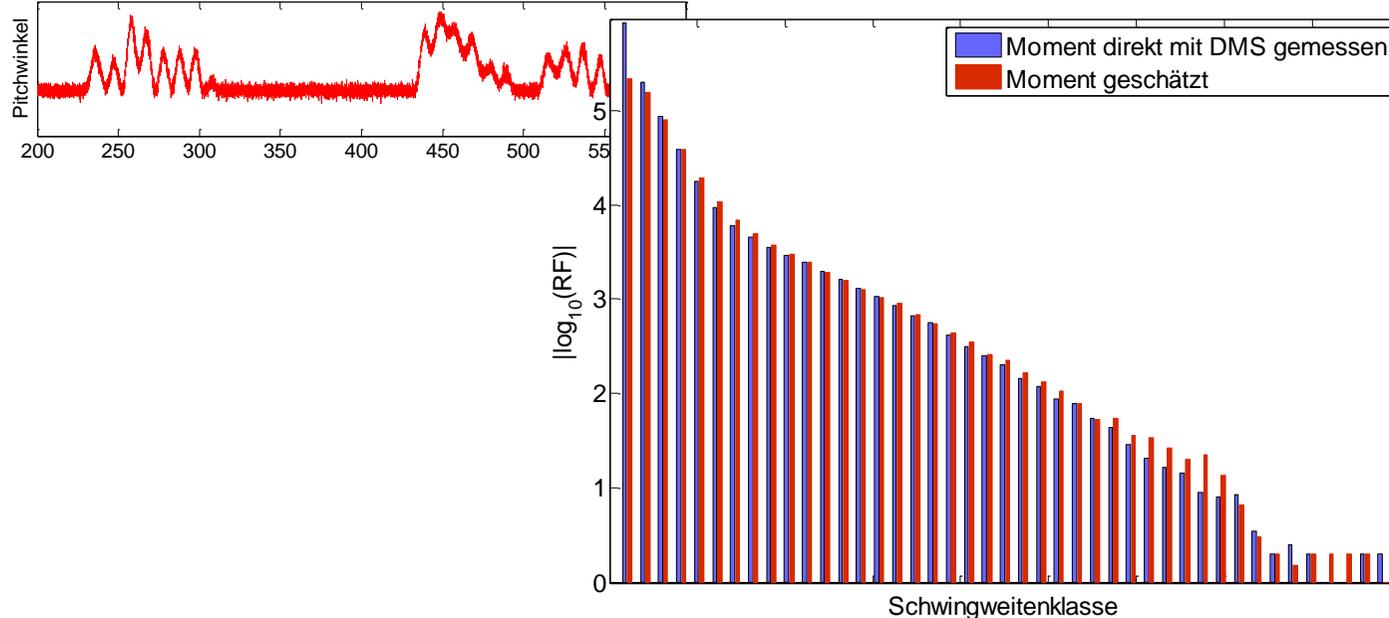
Zeitreihen



Blau: Biegemoment aus DMS

Rot: Biegemoment aus Turmbeschleunigung

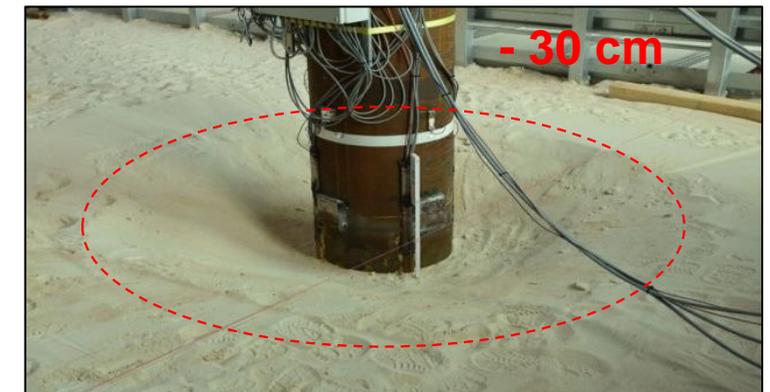
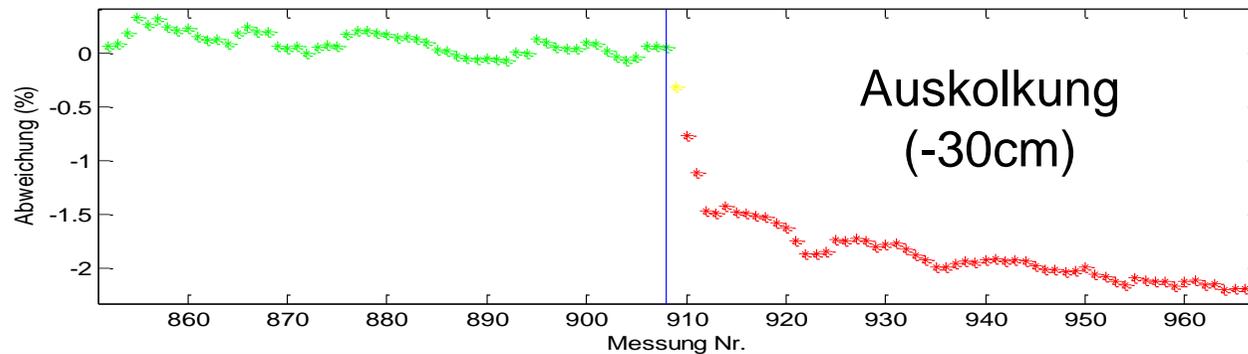
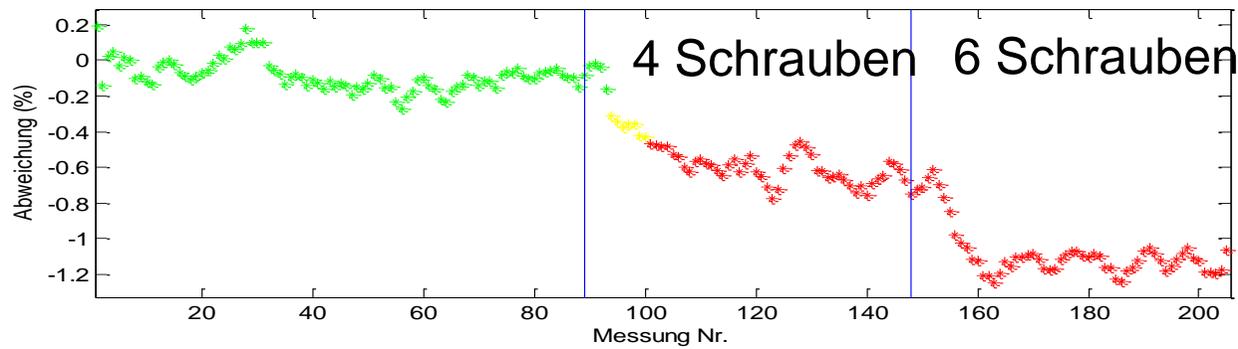
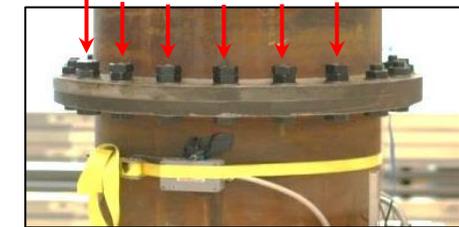
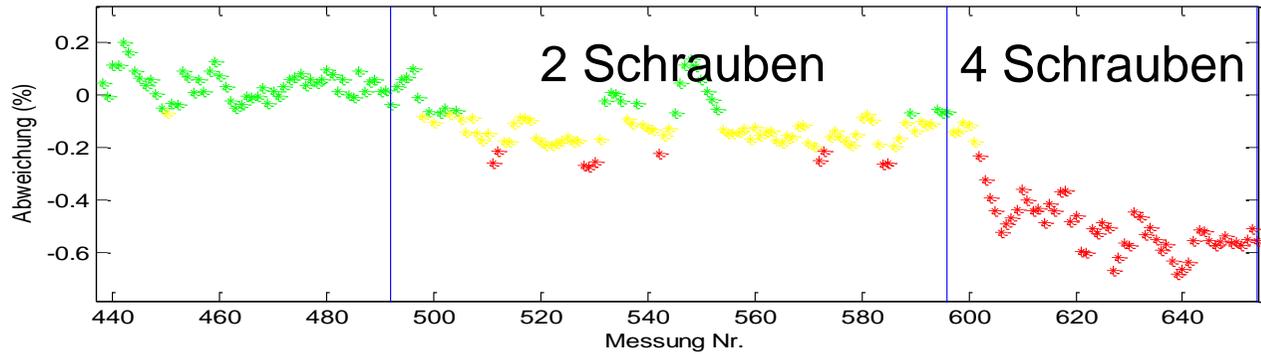
Rainflow Klassifizierung



Relative Schädigung (Palmgren-Miner)

Beispiele

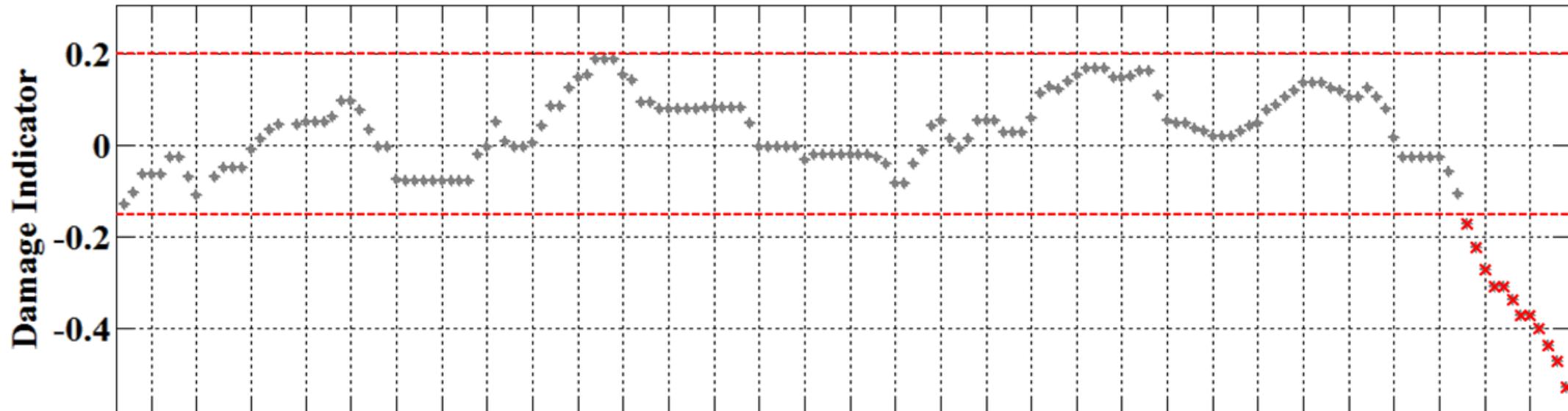
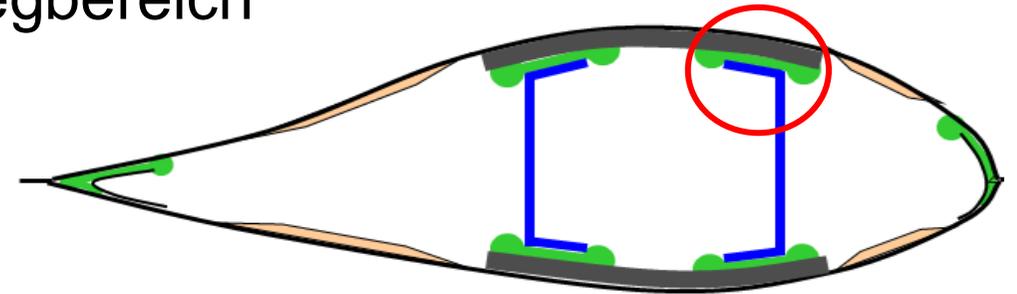
Indikatoren aus OMA



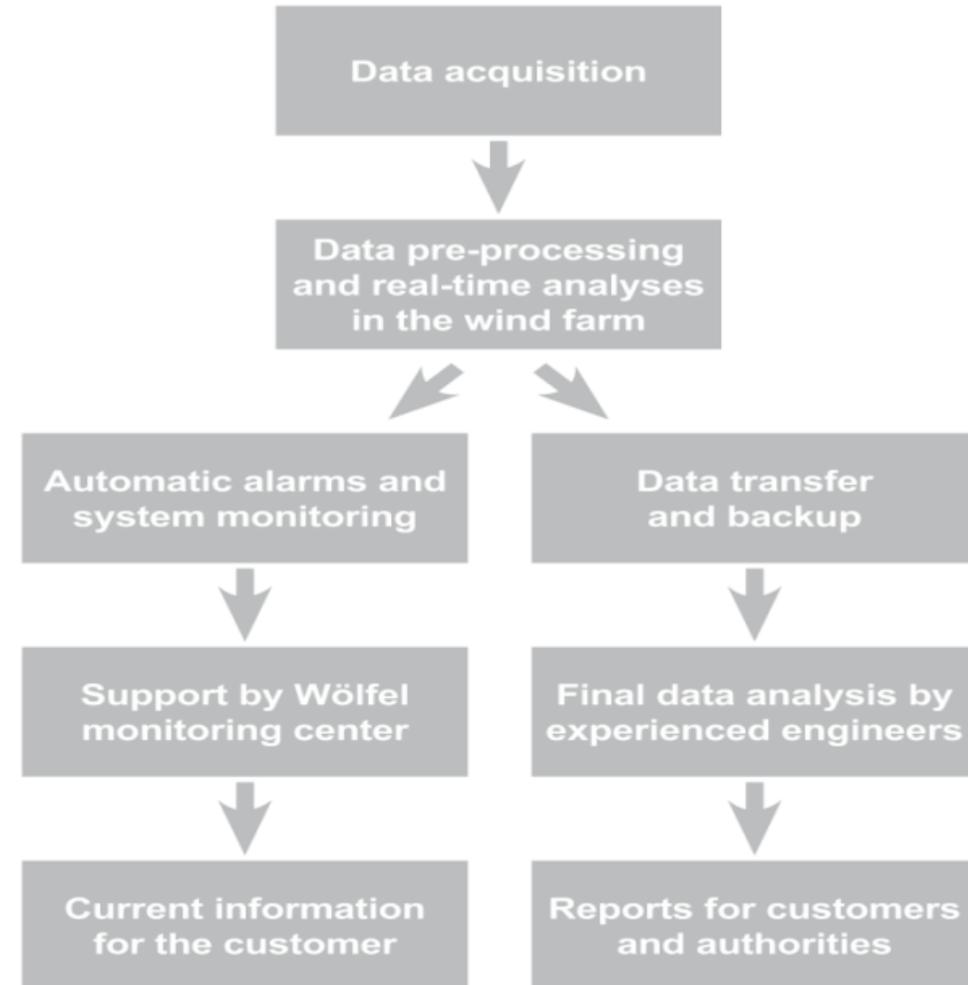
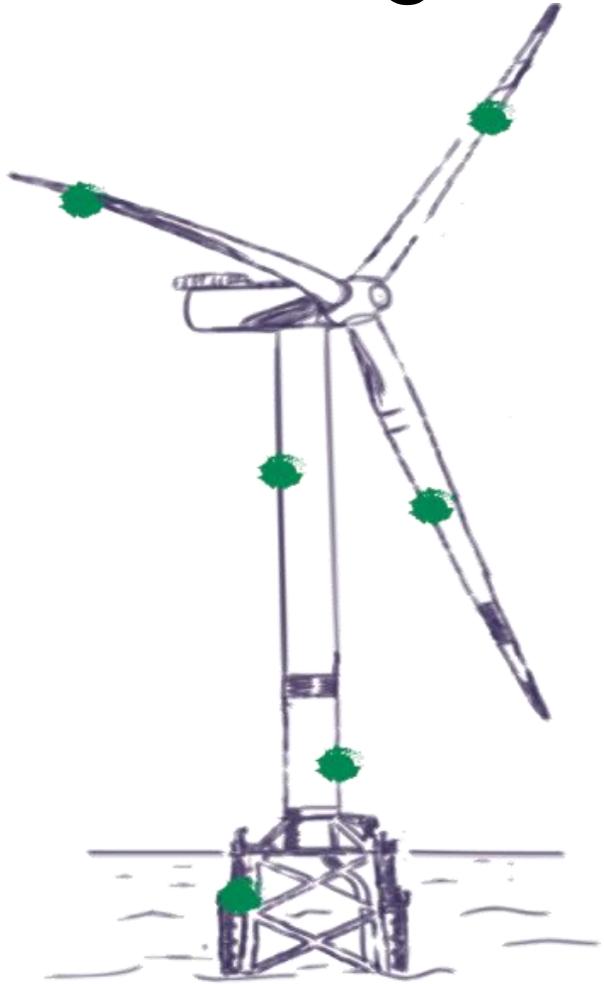
Beispiele Rotorblatt SHM

Früherkennung eines Rotorblattschadens im Stegbereich

- Erkennung eines schnell größer werdenden Schadens
- Frühzeitige Abschaltung der Turbine



Wölfel Monitoring



Referenzen

Erfahrung im Bereich Fundament- und Rotorblatt SHM / CMS

Alpha Ventus	Foundation (Jacket, Tripod) CMS
EnBW /SIEMENS	CMS for dynamical behavior of offshore wind turbines
RWE / SENVION	Foundation and Grout-CMS
IBERDROLA / ADWEEN	Foundation (Monopile, Jacket) and Grout CMS
EON	Continuous Condition Validation of offshore turbines
VESTAS	Tower and blade monitoring, Vibration Control
NORDEX	Lifetime tower monitoring; Blade monitoring
ENERCON	Blade monitoring, Vibration Control



Zusammenfassung

- Monitoring soll sich an Nachweiskonzept des Designs orientieren
- Focus auf kritische sowie auf wahrscheinliche Versagensszenarien; diesbezügliche Anpassung der Datenanalyse
- Robuste Sensorik in Verbindung mit mechanischem Strukturmodell kann detaillierte Aussagen liefern
- Frühzeitige Integration des Monitorings in das Konzept zur wiederkehrenden Prüfung – Anpassen von Inspektionsintervallen

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Wölfel-Gruppe
Max-Planck-Str.15
97204 Höchberg

Tel.: +49 931 49708-600
Fax: +49 931 49708-650
E-Mail: wbi@woelfel.de
www.woelfel.de



Dipl. –Ing. Bernd Wölfel
Tel.: +49 40 5247152-66
Fax: +49 40 5247152-70
E-Mail: bernd.woelfel@woelfel.de