

# bachmann.



# Structural Health Monitoring (SHM)

- Zu Risiken und Nebenwirkungen fragen Sie Ihren Strukturmechaniker!

**bachmann.**



# Anlagenmonitoring

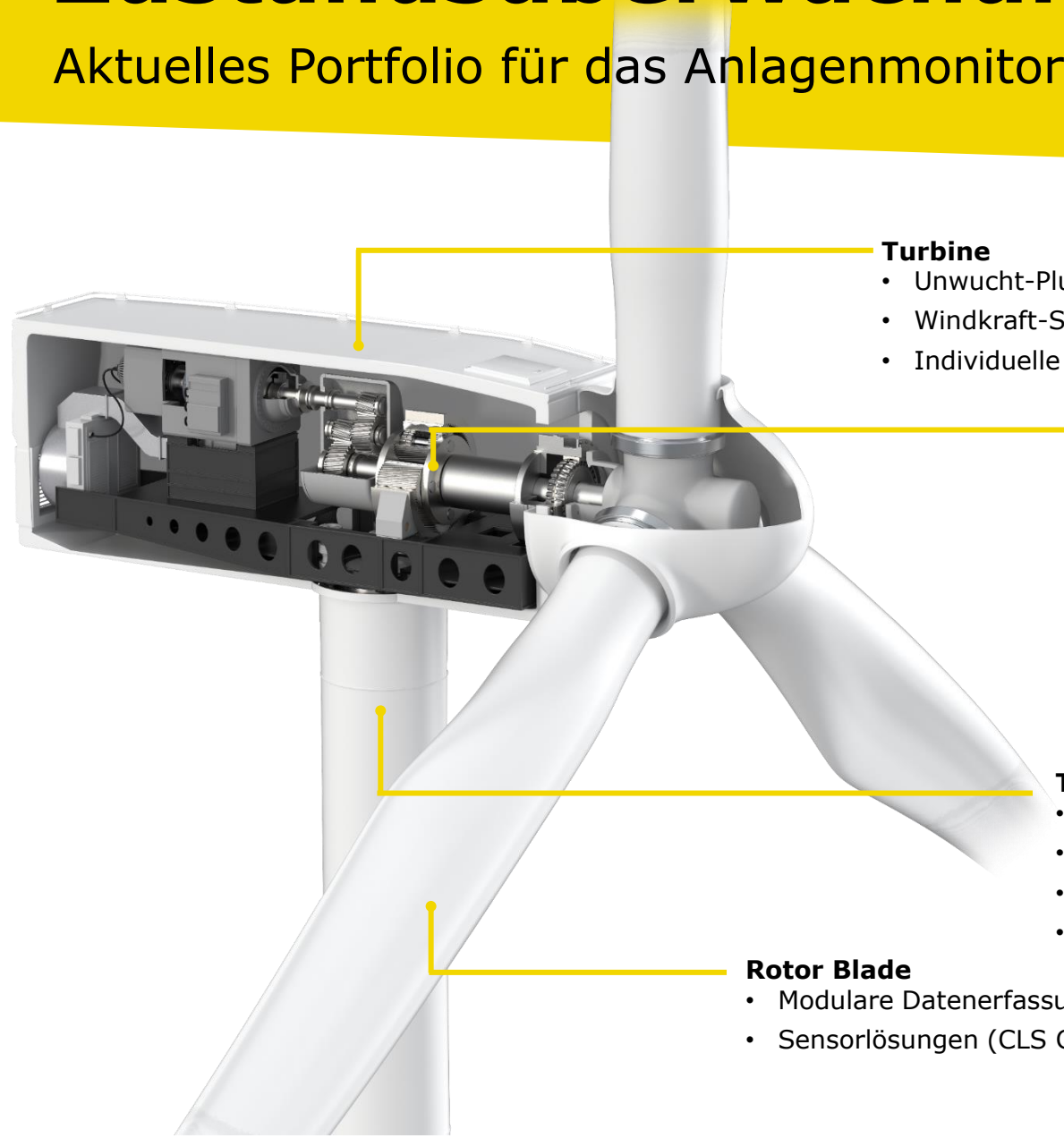
Aktuelles Portfolio und hardwaretechnische Realisierung

---



# Zustandsüberwachung

Aktuelles Portfolio für das Anlagenmonitoring



## Turbine

- Unwucht-Plugin
- Windkraft-SCADA (WPS)
- Individuelle fachliche Betreuung und Beratung

## Drivetrain

- CMScompact (Schwerpunkt Retrofit & Ersatz)
- CMSadvanced (Fokus auf moderne Hochleistungsturbinen)
- Steuerungsintegriertes CMS (Schwerpunkt WEA mit Bachmann-Steuerung)
- Sensorlösungen (BAM100, BAM500,  $\mu$ -Bridge)
- In WebLog Suite integrierte CMS-Toolbox

## Tower and Substructure

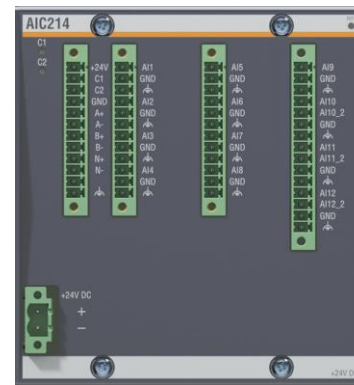
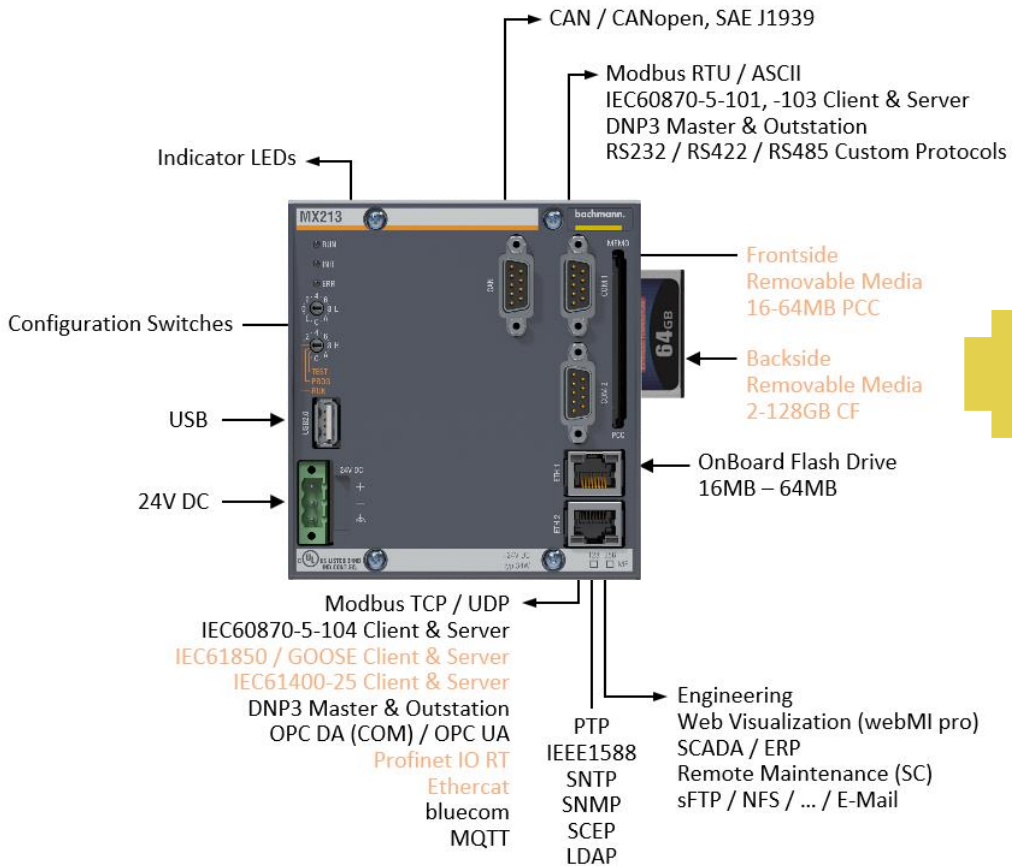
- Modulare Datenerfassungshardware
- Sensorlösungen (3D MEMS, CLS Cantilever Sensor)
- SHM-Toolbox integriert in WebLog Suite
- Standortspezifisches Engineering

## Rotor Blade

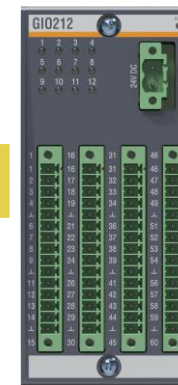
- Modulare Datenerfassungshardware
- Sensorlösungen (CLS Cantilever Sensor, 3D MEMS)

# Datenerfassung - Hardware

## CM-System und Sensoren



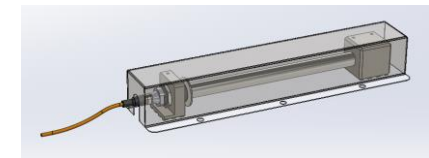
Messmodul: AIC214



I/O Modul: GIO212



3M MEMS (**M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ensors)



CL-Sensor für Rotorblatt und Turm



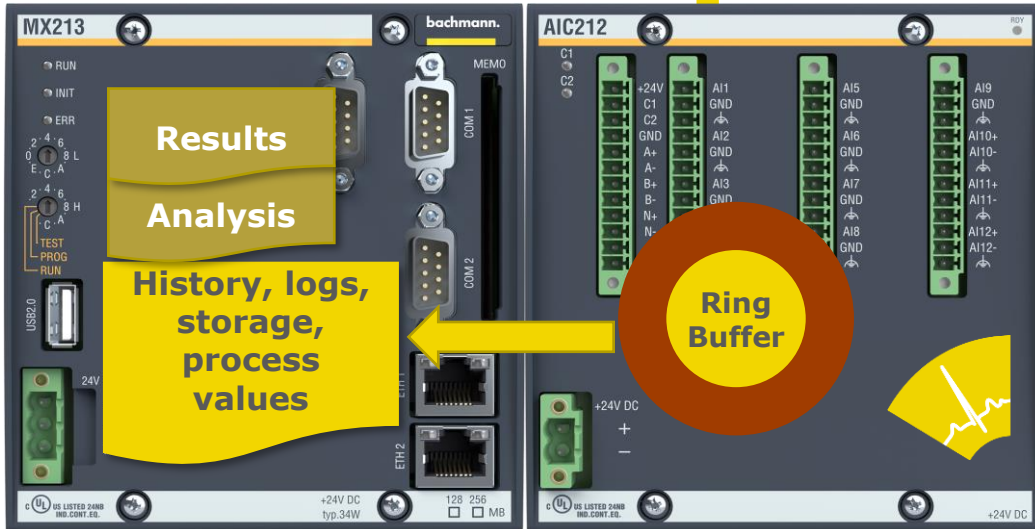
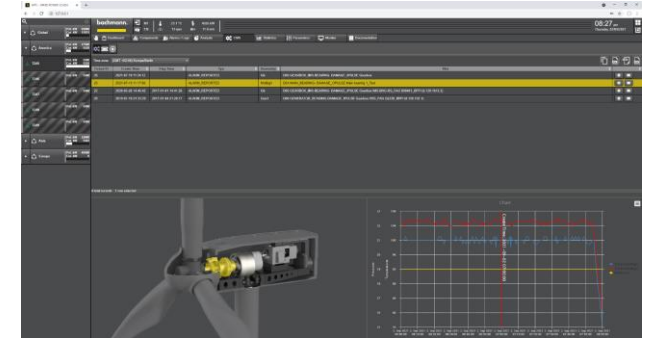
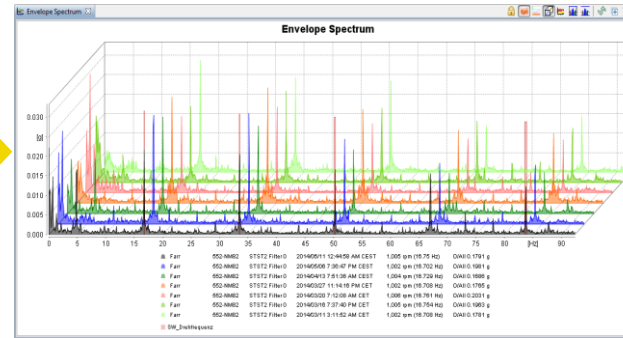
My-bridge



Beschleunigungssensoren:  
100 mV/g und 500 mV/g

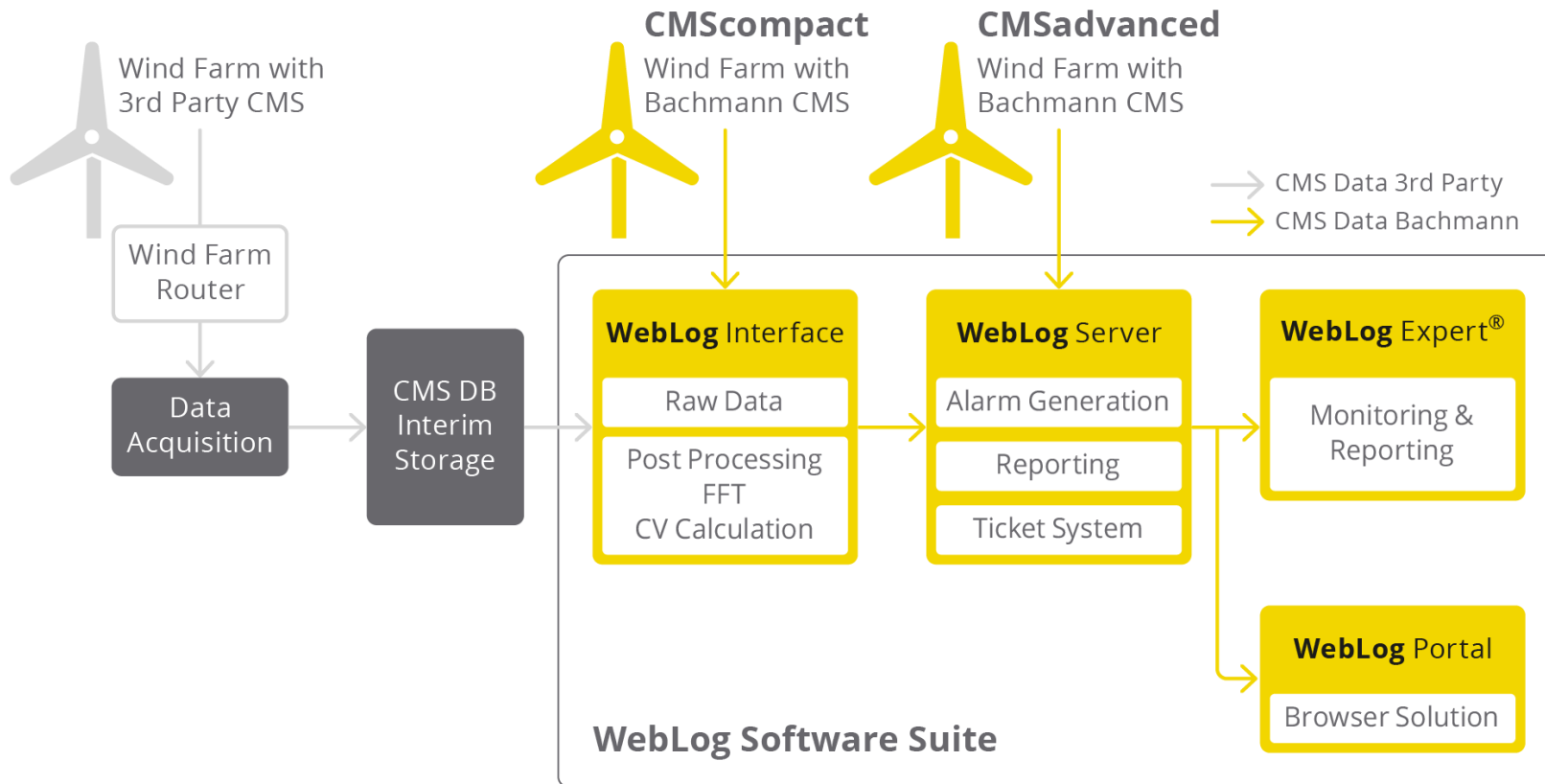
# Lösung

Hardware + Software + Service



# Aggregation und Analyse von Daten

WebLog Suite: Komplettlösung für die Zustandsüberwachung



# Motivation

**Warum ist Strukturmonitoring (SHM) scheinbar plötzlich so wichtig?**

---





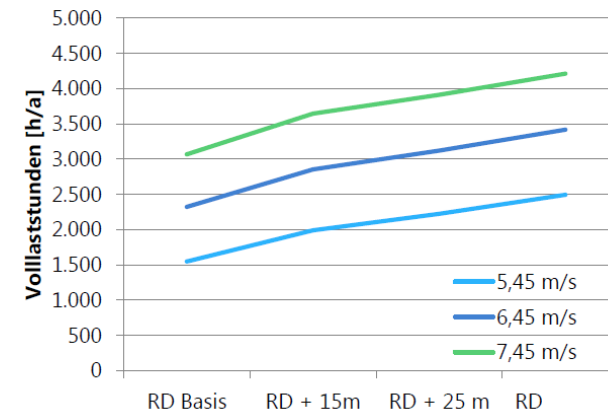
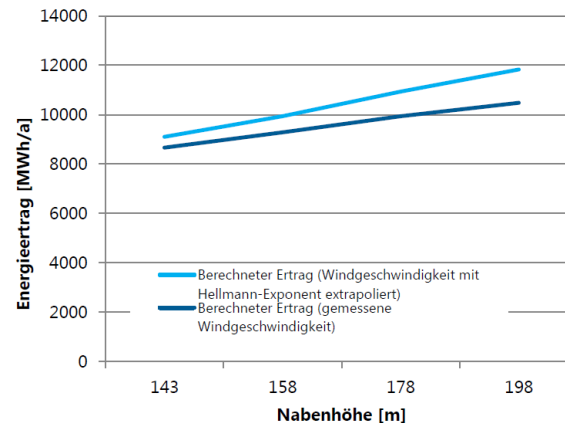
# Technologie und Ausrüstung

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Stromgestehungskosten

## Beispiel Anlagenhöhe und Rotordurchmesser

Mit der Nabenhöhe und dem Rotordurchmesser steigt der Ertrag der Anlagen und  $I_0 \uparrow$

(Einsatz von Hypridtürmen)

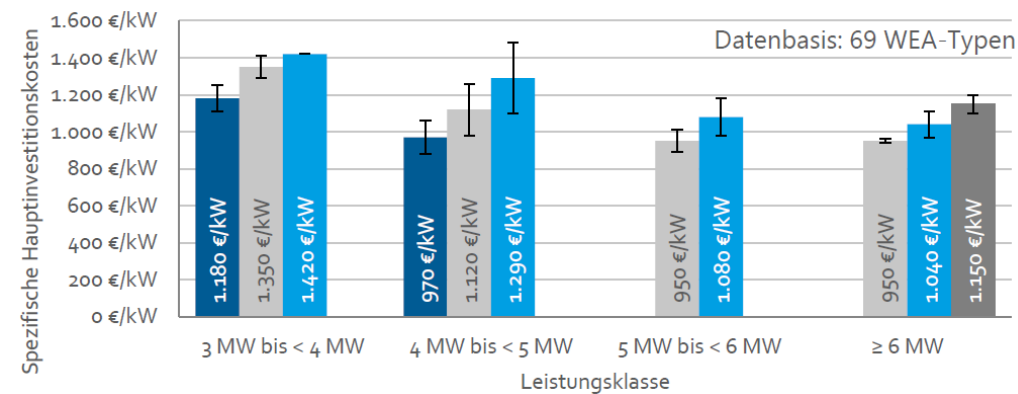


Die „SGK“ sind finanzmathematische Durchschnittskosten über die Nutzungsdauer der WEA

$$SGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el} \uparrow}{(1+i)^t}}$$

$I_0$ : Investitionsausgaben in Euro  
 $A_t$ : Jährliche Betriebskosten in Euro im Jahr t  
 $M_{el}$ : Produzierte Strommenge im jeweiligen Jahr in MWh  
 $i$ : Realer kalkulatorischer Zinssatz in % (hier WACC)  
 $n$ : Wirtschaftliche Nutzungsdauer (20 Jahre-30 Jahre)  
 $t$ : Jahr der Nutzungsperiode (1, 2, ...n)

Quelle: Deutsche Windguard, „Wirtschaftlichkeit Nabenhöhen“, 03MAP344 (AG), 2017



Gesamthöhe: ■ 100 m bis < 150 m ■ 150 m bis < 200 m ■ 200 m bis < 250 m ■ ≥ 250 m  
 † Standardabweichung

Quelle: Deutsche Windguard, „...Kostensituation der Windenergie...“, FKZ 03MAP393 (AG), 20. Dez. 2022

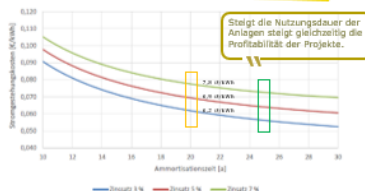
## Kostensenkung-Profitabilität

Einflussfaktoren auf die Stromgestehungskosten

$$SGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el}}{(1+i)^t}}$$

$i$ : Realer kalkulatorischer Zinssatz in % (hier WACC)

Sinken die Stromgestehungskosten „SGK“ bzw. „LCOE“ steigt die Rentabilität der Projekte



Steigt die Nutzungsdauer der Anlagen steigt gleichzeitig die Profitabilität der Projekte.

„SGK“ in Abhängigkeit von der Amortisationszins und dem Kapitalzinssatz

Quelle: A. Hübner, „Wirtschaftlichkeit von Offshore-Windenergieanlagen“, 03MAP344 (AG), 2017



# Strukturversagen

Höhere Risiken durch größere Anlagenhöhen und Rotordurchmesser



Quelle: [www.energie-und-management.de](http://www.energie-und-management.de)



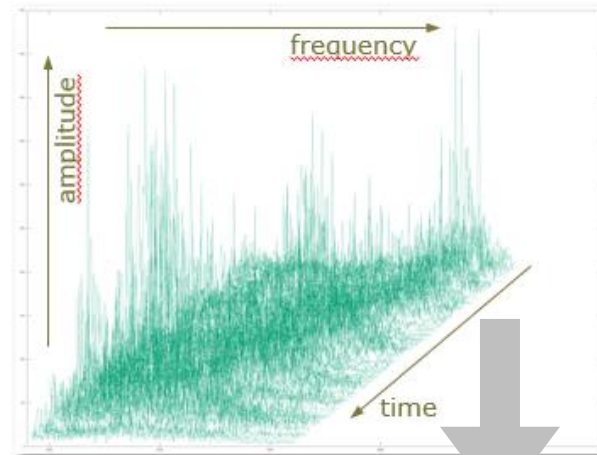
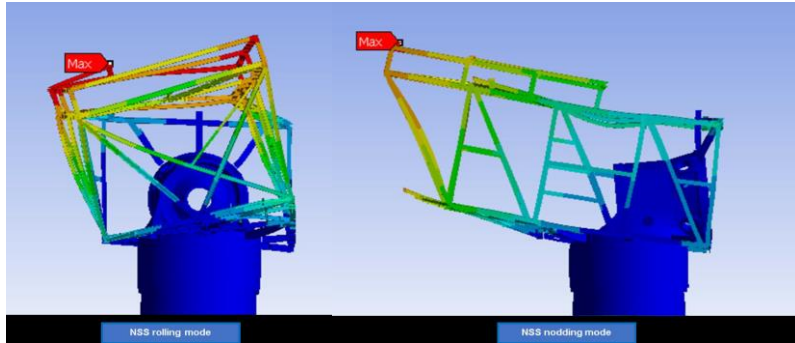
Bild: dpa/P. Pleul

Quelle:  
[www.nord24.de/landkreis-cuxhaven](http://www.nord24.de/landkreis-cuxhaven)

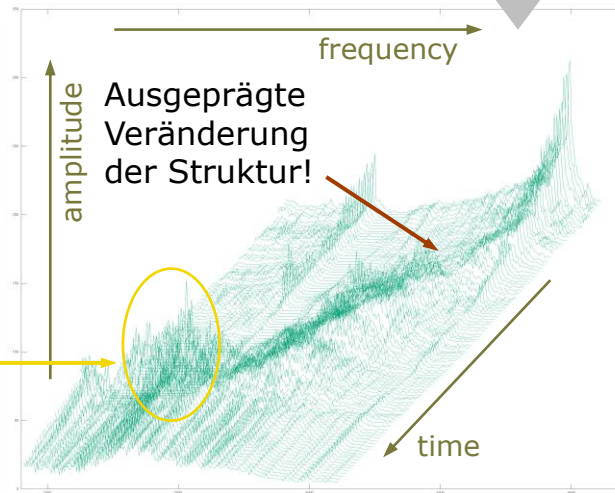


# Schadensvermeidung durch SHM

Beispiel: Strukturversagen



Die mathematische Extraktion des strukturelevanten EV-Spektrums ermöglicht die Überwachung der Struktur

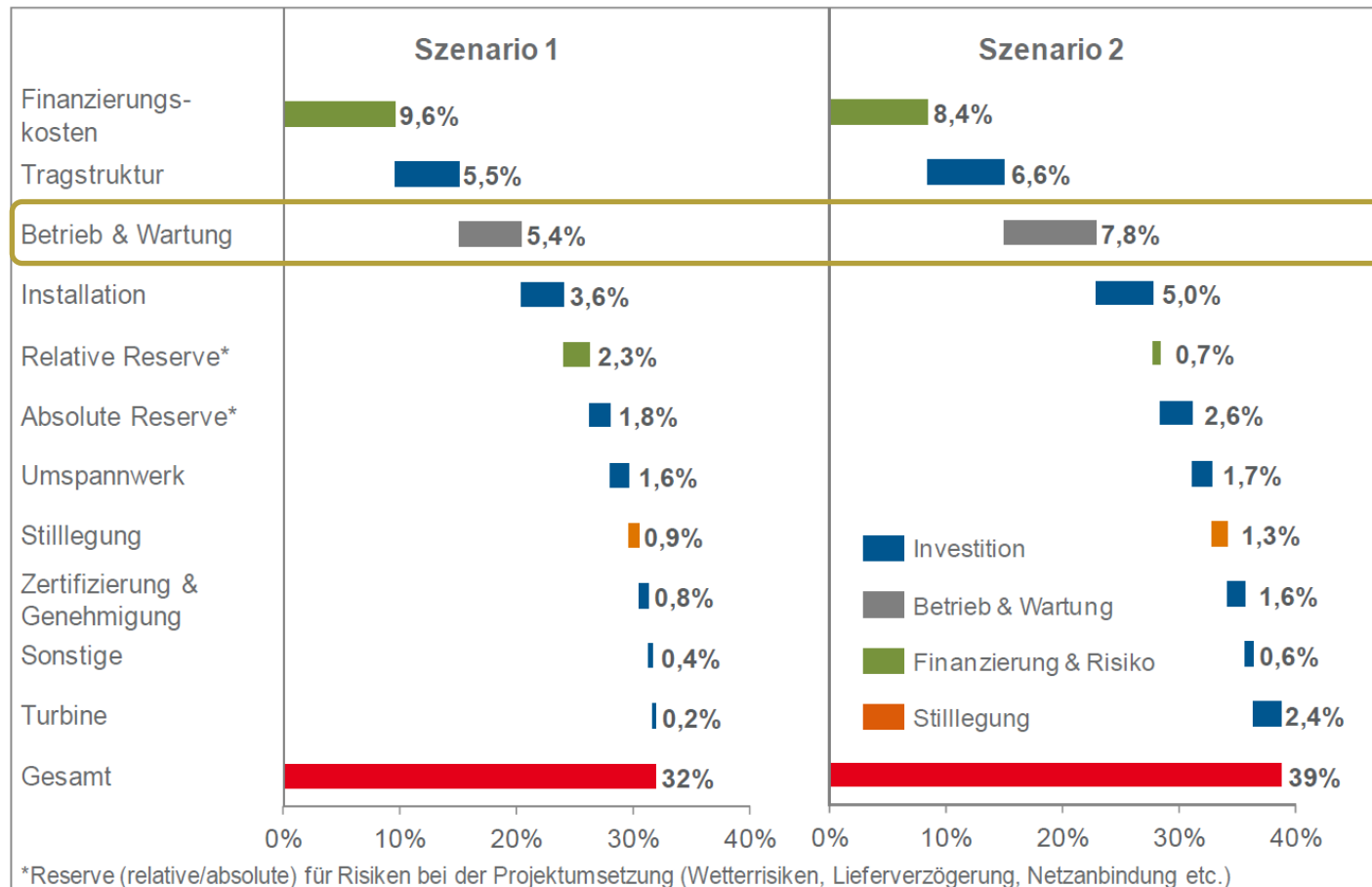


WTG	Begin	Damage Indicator	End	
WTG 17	12/15		04/19	Alarm
WTG 03	01/16		05/20	
WTG 34	12/15		07/19	
WTG 01	12/15		06/19	
WTG 75	02/16		05/20	OK
WTG 49	12/15		05/20	
WTG 42	03/16		05/20	OK
WTG 12	10/15		05/20	
WTG ..	01/20		05/20	
WTG ..	12/15		07/19	OK



# Kostensenkungspotenziale

## Vorhersehbare Profitabilität



Die Reduktion der Betriebs- und Wartungskosten sowie die Senkung der Finanzierungskosten bieten die größten Einzelpotenziale.

Quelle: Prognos-Fichtner-Studie

$$\text{Gewinn} = \text{Einnahmen} - (\text{CAPEX} + \text{OPEX})$$

**Einnahmen** die Einnahmen aus dem Verkauf des erzeugten Windstroms.

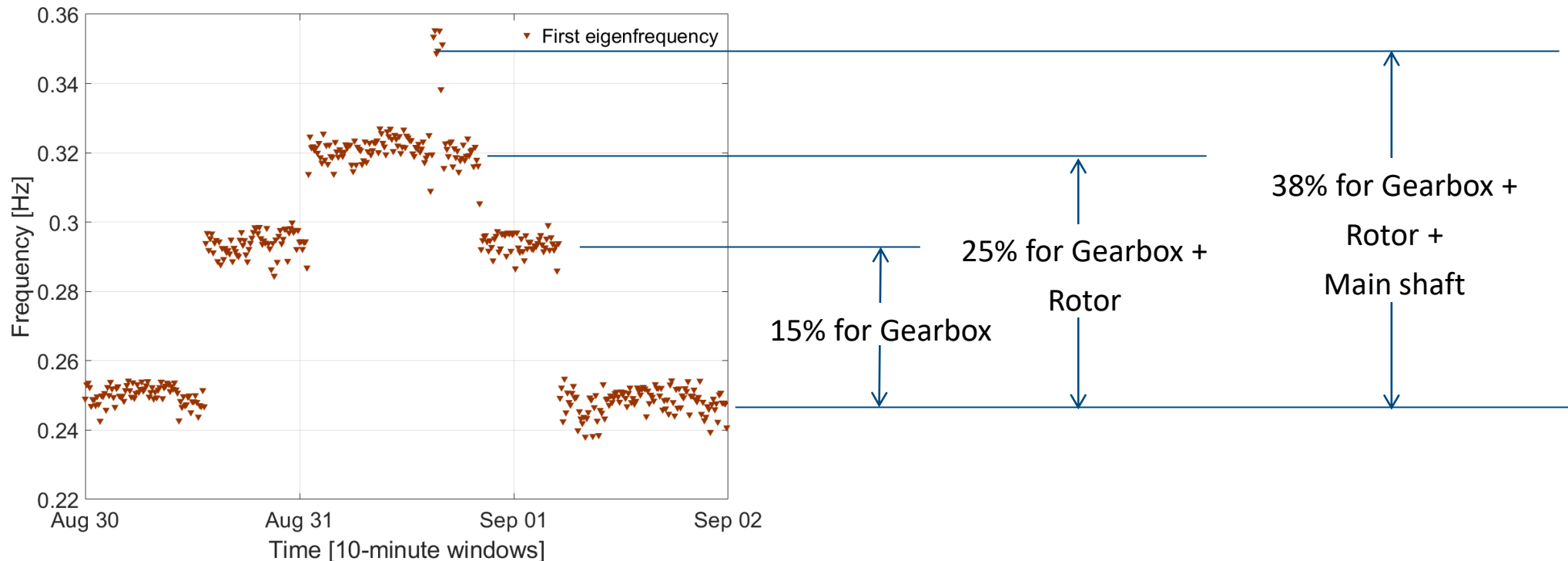
**CAPEX** die Investitionskosten sind, die Kosten für den Bau, von Windprojekten: WEA, Infrastruktur

**OPEX** die operativen Kosten fallen während des Betriebs und der Instandhaltung des Projekts an: dies sind die laufenden Kosten z.B. für Wartung, Betrieb, Versicherungen, Personal usw.



# Eigenfrequenz Monitoring

Änderungen der Eigenfrequenzen durch Instandsetzungsarbeiten: Austausch des Hauptlagers.

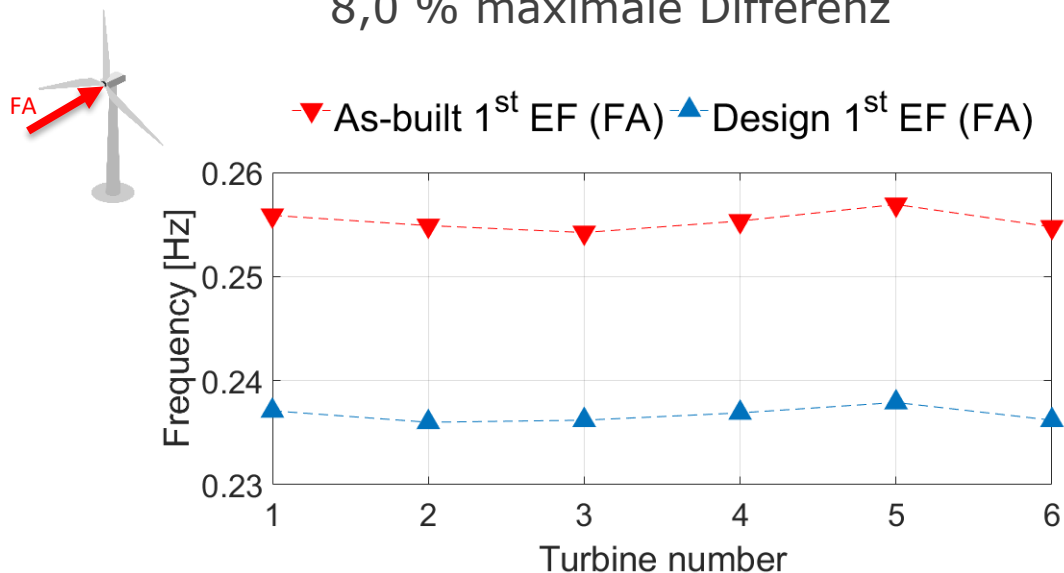


Solche Informationen helfen bei der Identifizierung von Fehlalarmen und können zur Feinabstimmung von FE-Modellen verwendet werden

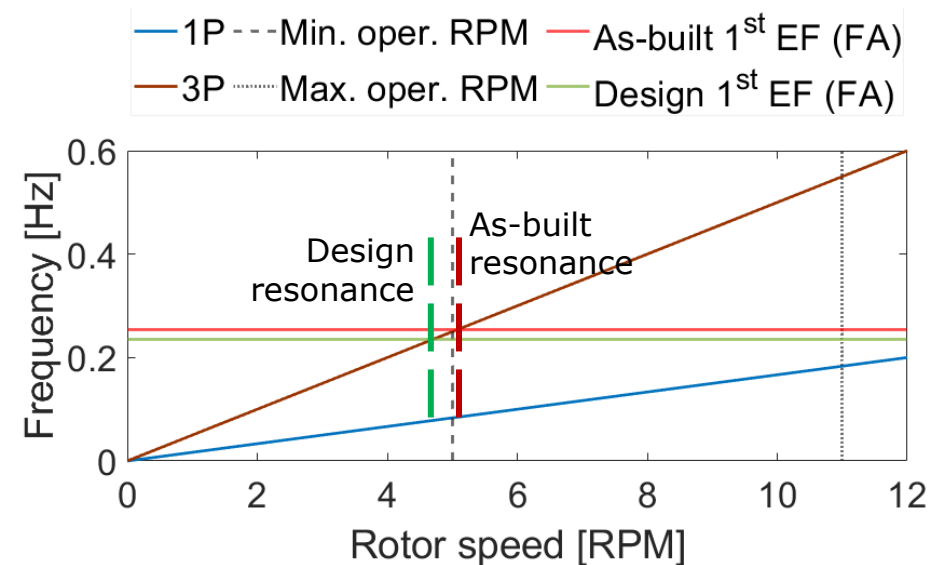
# Eigenfrequenz Monitoring

Eigenfrequenz: Designverifizierung und Steuerungsoptimierung.

Die „as-built“ ersten Eigenfrequenzen sind höher als die Auslegung:  
8,0 % maximale Differenz



Campbell-Diagramm überlagert mit Design und „as-built“ ersten FA EFs



Die Aktualisierung der Windturbinensteuerung auf Basis von SHM trägt dazu bei, den tatsächlichen „as-built“ Resonanzbereich zu vermeiden, um die sichere Funktionalität einer Windturbine zu gewährleisten.

# Finanzierung von Windprojekten

## Wesentliche Faktoren

### Wesentliche Faktoren zur Finanzierung

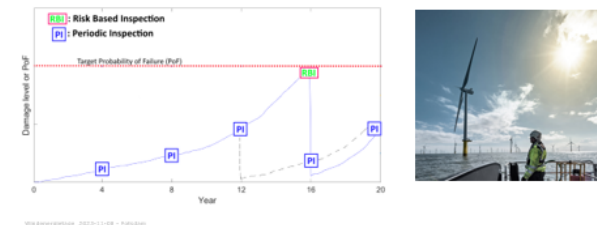
- Standortauswahl und Windressourcen
- **Technologie und Ausrüstung** -> Turbinentyp, Turm, integrierte Messtechnik
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Projektentwicklung und Genehmigungen
- **Power Purchase Agreements (PPAs)** -> bzw. Art der Stromvermarktung
- Investitionskosten und Finanzierungsoptionen
- **Betriebs- und Wartungskosten** -> z.B. Reparaturrücklage, Versicherungen, Wartungsvertrag
- Umweltauswirkungen und soziale Aspekte
- **Risikomanagement** -> z.B. O&M Konzept
- ...

Nicht alle Faktoren sind gleichwertig aus der Sicht einer Risikobewertung des Projektes.

### SHM für die Planung von Inspektionen

As support for Risk /Condition-based inspection planning decisions.

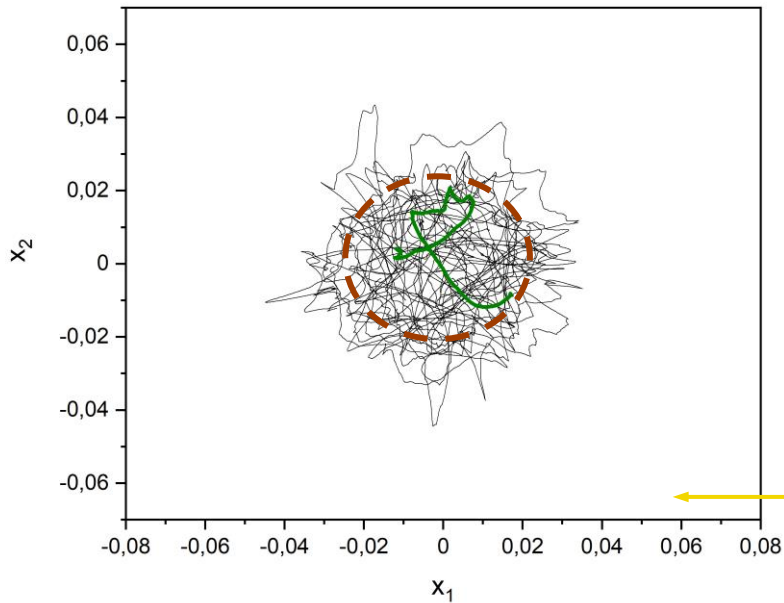
Visualisierung von 4-Jahres-Plänen zur regelmäßigen Inspektion und Wartung („PI“) im Vergleich zu risikobasierten (zustandsbasierten) Inspektions- und Wartungsplänen („RBI“)



# Bewegung der Anlage WEA 16 in $\mathbb{R}^2$

Beispiel Strukturüberwachung WP mit 22 WEA

Evolution vom 01.01.2017 - 20.08.2018

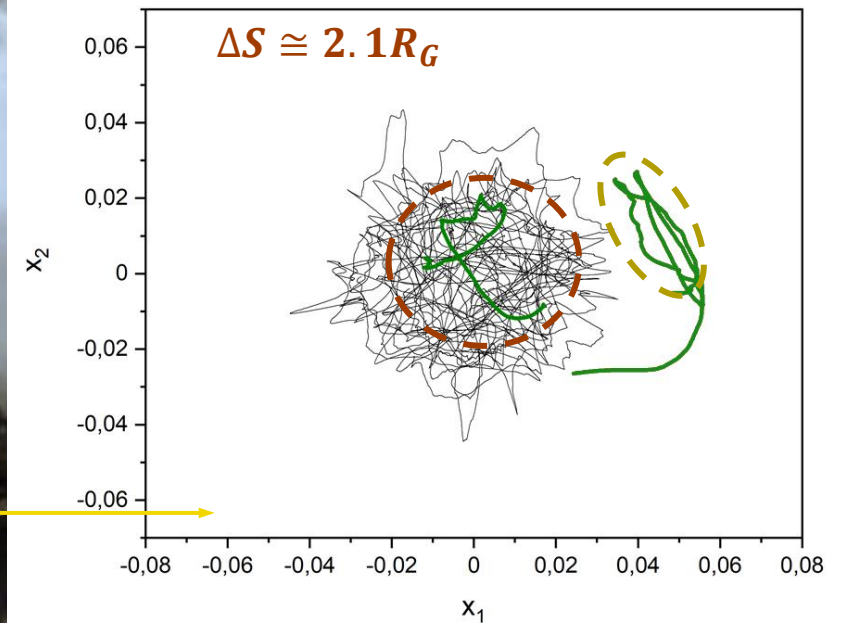


Verhalten  
vor dem  
Brand

Verhalten  
nach der  
Reparatur

Quelle: dpa WIWO

Evolution vom 27.04.2020 - 01.06.2021



Gyrationsradius Referenzmenge:  $R_G$   
Abstand der Schwerpunkte:  $\Delta S$



# SHM für WEA

Beispiel: Strukturüberwachung

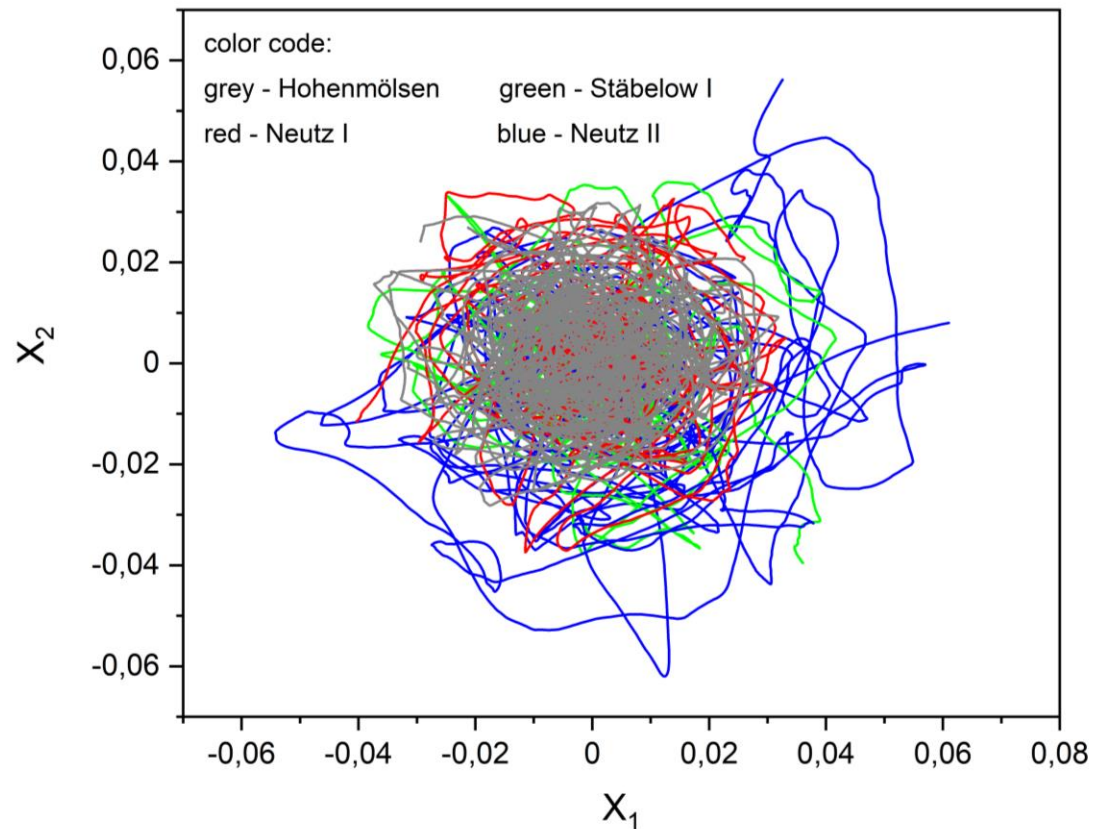
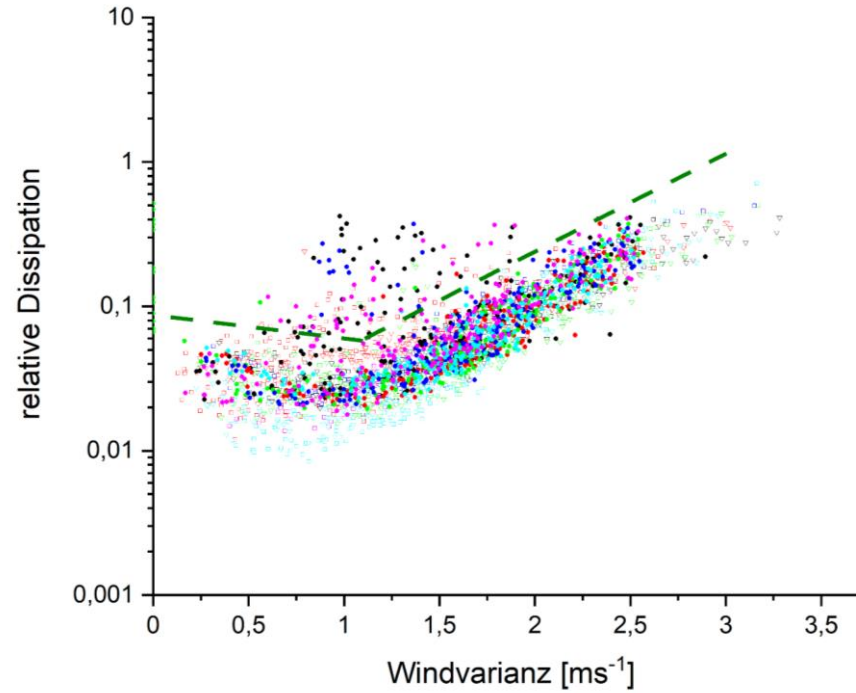
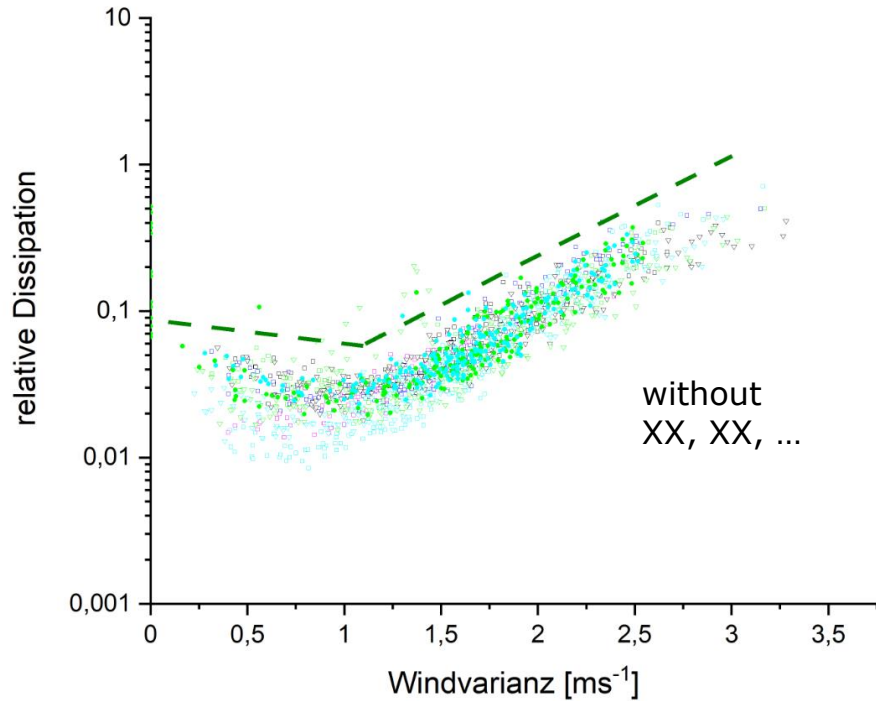


Bild: eno energy



# Beurteilung der Strukturintegrität

## Nutzung der Energiedissipation



Der Beurteilung liegt die Annahme zugrunde, dass dynamische Windanregung unter anderem die „ungestörte“ Turmkonstruktion zu Schwingungen mit ihrer 1. Turmeigenfrequenz anregt. Die Schwingungsenergie wird dann je nach Dämpfung beispielsweise in Wärme umgewandelt.



# Lifetime Extension (LTE)

Ein technischer Spagat aus „Blick in die Zukunft“ und „Kompatibilität über Generationen“.

---



# Lifetime Extension (LTE)

Ein technischer Spagat über mehr als 20 Jahre – geht das?

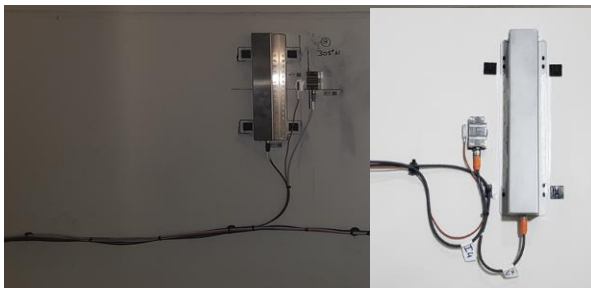
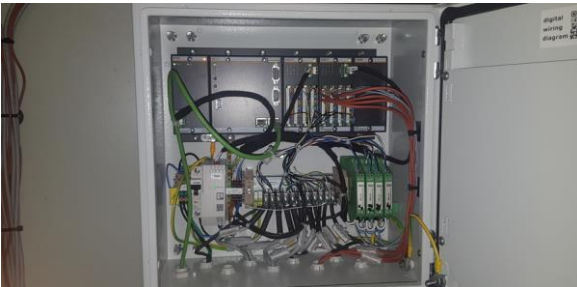
Zum Vergleich das **Jahr 2000 vs. 2023** ...



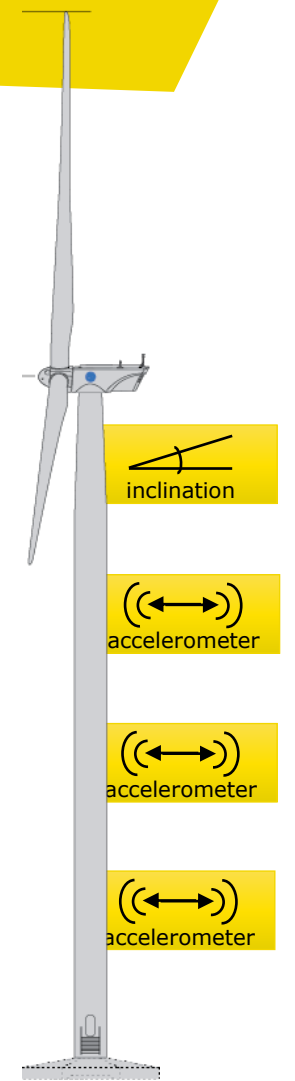
**CPU Upgrade**  
Höhere Performance  
State of the Art Cyber  
Security Schutz



# General Info – SAM



Komponente	RND [a]	RND [a]
Rotorblatt	0,0	9,9
Verschraubung Blattlager	2,6	4,6
Nabe	3,2	6,5
Verschraubung Welle-Nabe	16,7	20,0
Rotorwelle	15,5	20,0
Hauptlagerbock	0,0	11,4
Verschraubung	12,0	20,0
Maschinenträger	0,0	20,0
Verschraubung Azimutlager	8,2	20,0
Turm und Gründung	2,8	4,7



# SHM: Tower Monitoring System

Experience counts: References

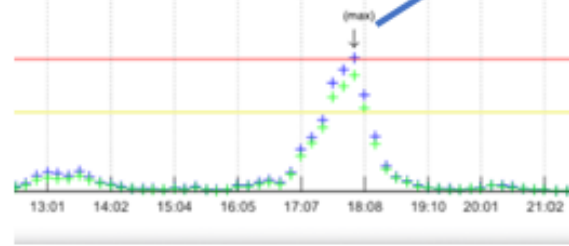
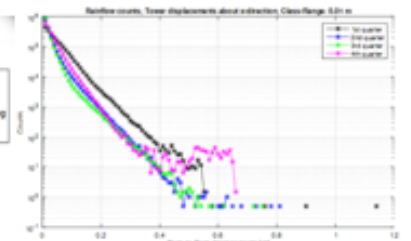
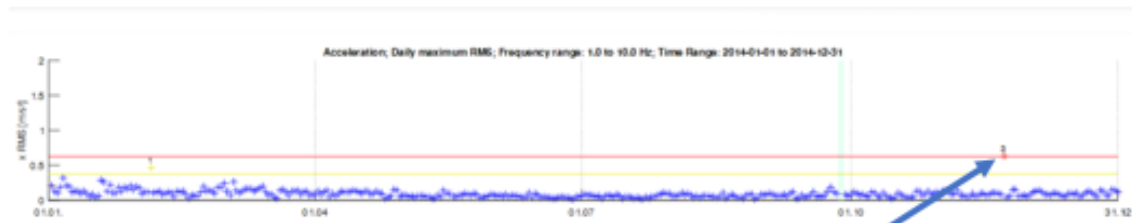
- Data recording
- Read data from the SVM300
- save data
- Send data via Ethernet



SVM300



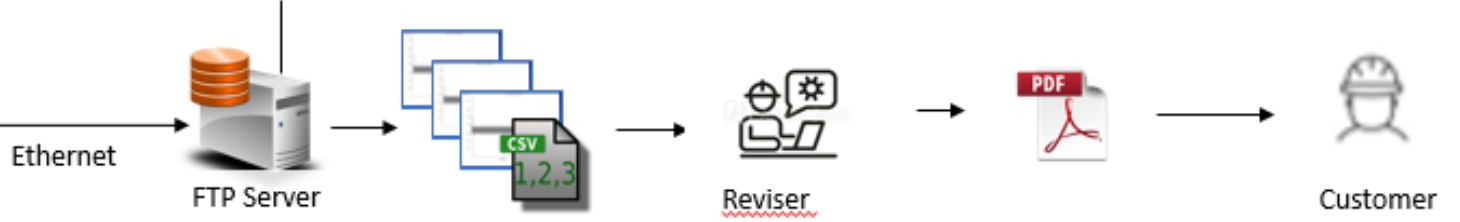
TMS Cabinet



Example: An event in the year with significant vibration amplitudes more than an hour!

- Calculations (displacements, moments, RFC's)
- Creation of statistics
- Data retention for reports
- Raw data backup for 5 years

- Report for every turbine and every park
- Preliminary check for plausibility of plots and statistics
- Transmission of reports, data gaps Summary
- Further estimates



# Beispiel: SHM für das Rotorblatt

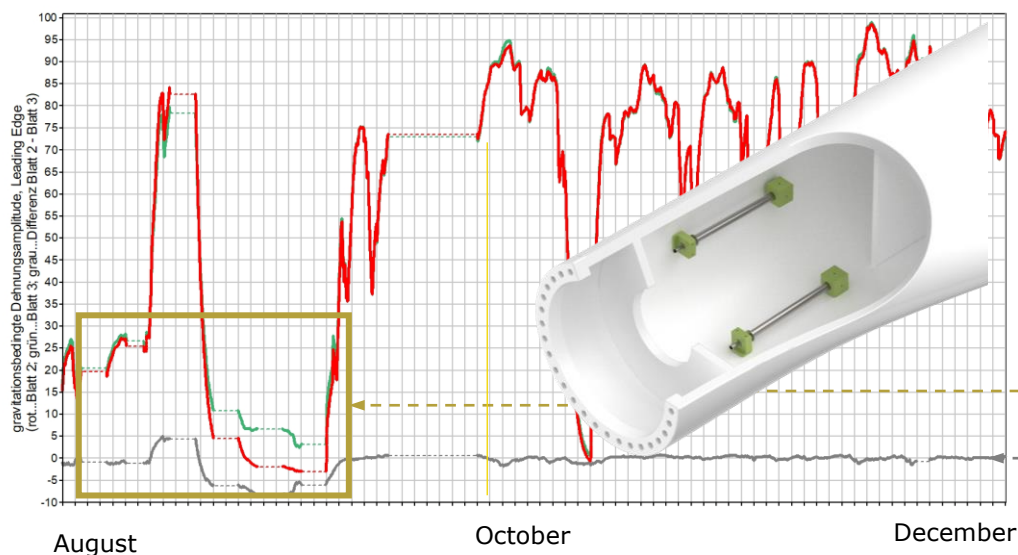
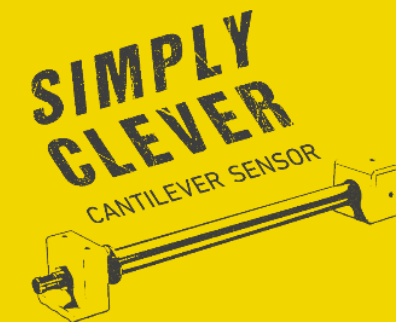
Frage: Wie nachhaltig ist die Reparatur?

---



# Cantilever Sensor

Strukturüberwachung für Rotorblatt und Turm.

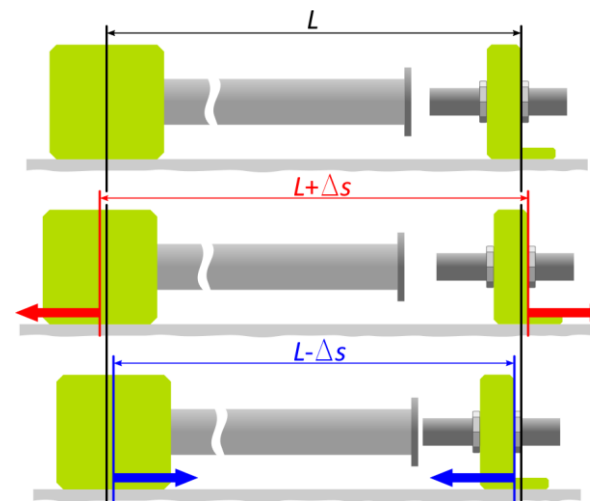


Vergleich geschädigtes

- Blatt 2 mit
- Blatt 3

Zeitraum verschiedener Reparaturkampagnen

gebildete Differenz der Blattamplituden



$$\epsilon = \frac{\Delta s}{L}$$

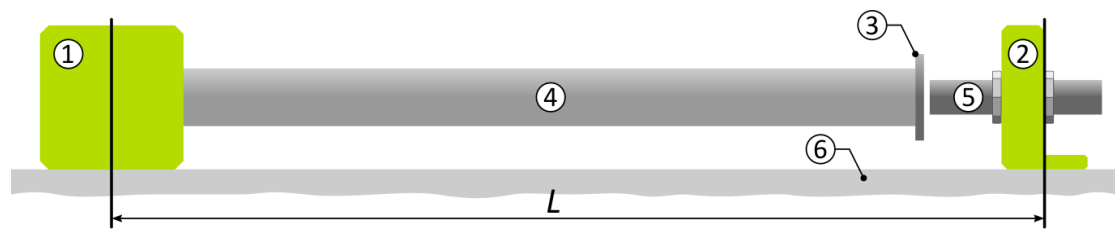
$$\Delta \epsilon_{Res} = \frac{\Delta s_{Res}}{L}$$

$$\epsilon_{min/max} = \pm \frac{1}{2} \frac{s_{max}}{L}$$

Gesamtlänge: 37,5 cm

Beispiel: Zyklische Reparatur Delamination der Vorderkante

- 1 - Cantilever-Halter
- 2 - Sensorhalter
- 3 - Target
- 4 - Cantilever
- 5 - Abstandssensor
- 6 - Messobjekt





# Optimierungspotenziale: Betriebskosten

Wesentliche Bestandteile der Betriebskosten

## $A_t$ : Beispiel Optimierung der Betriebskosten:

Durch den Einsatz z.B. von SHM und CMS lassen sich die jährlichen Betriebskosten um ca. 1,5 % pro Jahr senken.

$$SGK = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t \downarrow}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el} \uparrow}{(1+i)^t}}$$

Tabelle: Jährliche Betriebskosten eines typischen Windparks

	Prozentsatz vom WEA-Preis
<b>Wartungsvertrag (Standard)</b>	0,7-0,9
<b>Reparaturrücklage (kalk. Ansatz)</b>	0,5-1,0
<b>Versicherungen</b>	0,5-0,6
Landpacht	1,0-1,2
Technische Überwachung u. Verwaltung	0,5-0,6
Sonstiges (Wartung <u>periph.</u> Anlagen)	0,8-1,0
<b>Gesamte jährliche Betriebskosten</b>	<b>4,0-5,3</b>

Quelle: A. Schneider: "Wirtschaftlichkeit von WEA und Versorgungsanalyse Max Bögel Sengenthal", März 2022, Nürnberg

Jährliche Kosten für einen Vollwartungsvertrag können 1,5 bis 2,5 Prozent des Anlageninvestitionspreises pro Jahr betragen.

Ein Bericht von GE Digital schätzt, dass Unternehmen durch den Einsatz von Condition Monitoring die Kosten für Wartung, Reparatur und Ersatzteile um bis zu 40% reduzieren können.



# Fazit

## SHM - zu Risiken und Nebenwirkungen

- ✓ Höhere Türme und größere Rotoren:
  - ermöglichen einen signifikant größeren Ertrag
  - gleichzeitig steigt das Risiko
- ✓ SHM hilft das Risiko zu minimieren und beherrschbar zu machen
- ✓ SHM ermöglicht Lifetime Extension (LTE) von Beginn an
- ✓ Strukturmonitoring sollte permanent erfolgen:
  - Erhöhte Sicherheit durch überwachten Betrieb
  - Spart Geld: Wartung und Inspektion (durch angepasste Inspektionszyklen)
  - SHM trägt dazu bei, die berechnete Nutzungsdauer zu erhöhen



**Wir sollten und können unsere Windenergieanlagen besser und länger nutzen!**



# Fragen?



**bachmann.**

