# Zustandsüberwachung und Lastdatenerfassung mittels mitdrehender Sensorik auf Rotorwellen von Windenergieanlagen

Dipl.-Ing. Martin-Christopher Noll
Sebastian Reisch, M.Sc.

VDI Wissensforum

11.07.2018 – 3. VDI-Fachkonferenz
Schadensmechanismen an Lagern 2018

# Gliederung

1. Kurzvorstellung i4M technologies GmbH
2. Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA
3. Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen
4. Vorstellung eines beispielhaften Systems
5. Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand
6. Zusammenfassung und Ausblick

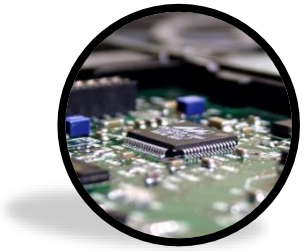
# Gliederung

1. **Kurzvorstellung i4M technologies GmbH**
2. Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA
3. Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen
4. Vorstellung eines beispielhaften Systems
5. Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand
6. Zusammenfassung und Ausblick

# Kurzvorstellung i4M technologies GmbH

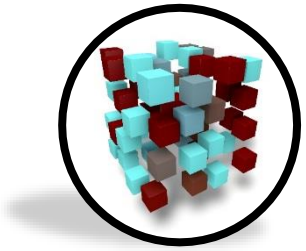
## Systemanalyse

- Analyse mechanischer Systeme hinsichtlich
  - Sinnvoll erfassbarer Messgrößen,
  - Minimierung der Messstellenanzahl,
  - Evtl. Nutzung vorhandener Größen,
  - Auswahl geeigneter Sensorik,
  - Auswahl geeigneter Datenanalyseverfahren.



## Messtechnikentwicklung

- Entwicklung maßgeschneiderter, kostenoptimierter Lösungen zur Erfassung mechanischer, elektrischer und thermischer Größen
  - Sensorentwicklung
  - Messkettenentwicklung
  - (Drahtlose) Datenübertragung / Drahtlose Sensornetzwerke

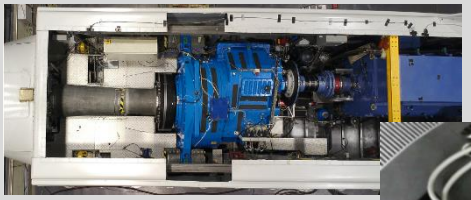


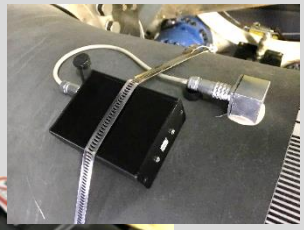
## Datenanalyse

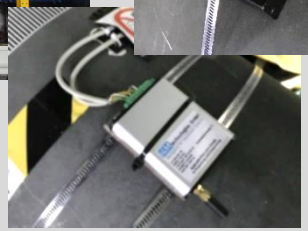
- Entwicklung von Konzepten zur Informationsextraktion und Datenreduzierung
- Implementierung von Datenanalysemethoden am Ort der Messgrößenaufnahme (Smart Sensors / Edge Computing)
- Automatisierte Generierung von Zustandsmeldungen

# Kurzvorstellung i4M technologies GmbH

## Load- und Condition Monitoring an Windenergieanlagen

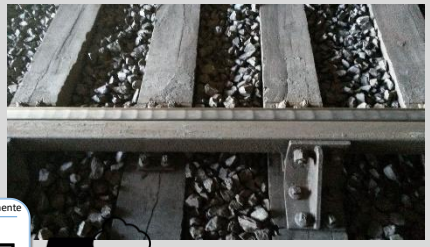






Sensoren auf rotierender Rotorwelle einer Wind-Energieanlage

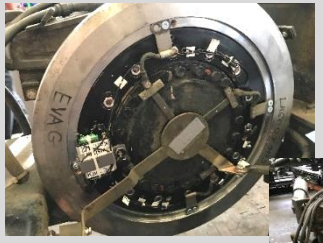
## Condition Monitoring von Straßenbahninfrastruktur



Online Monitoring von Gleisfehlstellen

# Beispielprojekte

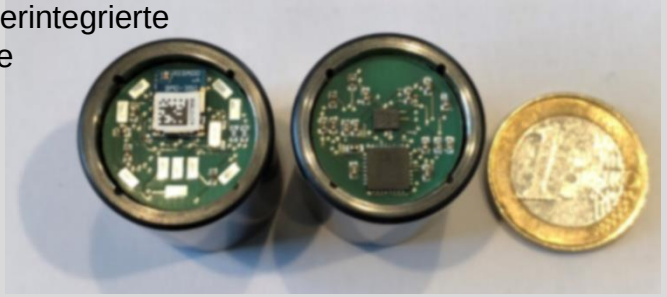
## Messungen an Schienenfahrzeugen



Straßenbahnfahrgestell
$a_{max}$ > 100 g

## Messungen an Antriebskomponenten

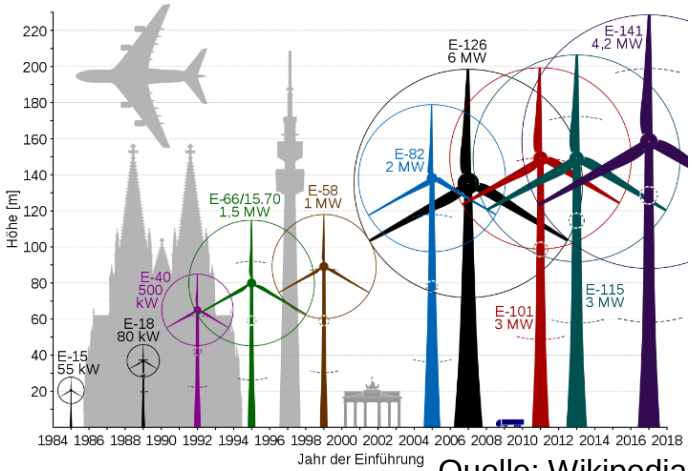
Wälzkörperintegrierte Telemetrie



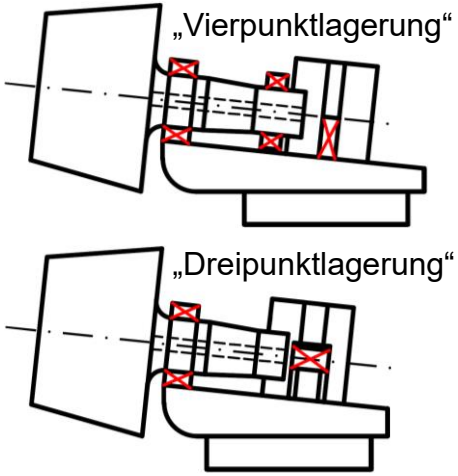
# Gliederung

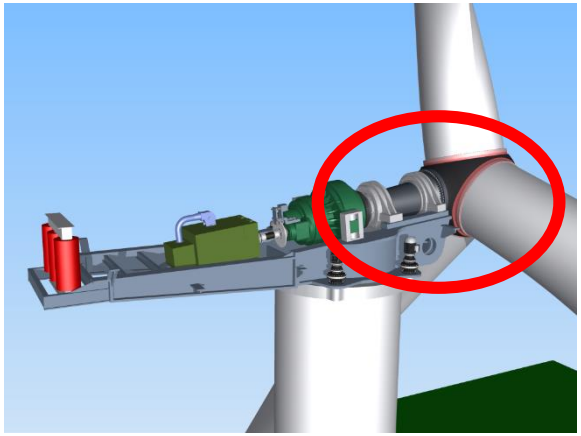
1. Kurzvorstellung i4M technologies GmbH
2. **Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA**
3. Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen
4. Vorstellung eines beispielhaften Systems
5. Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand
6. Zusammenfassung und Ausblick

# Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA




Quelle: Wikipedia

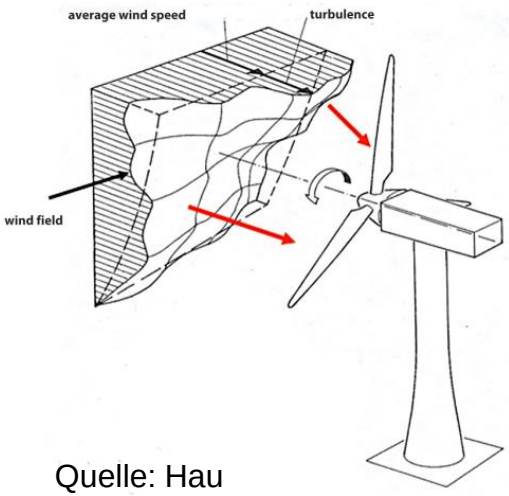


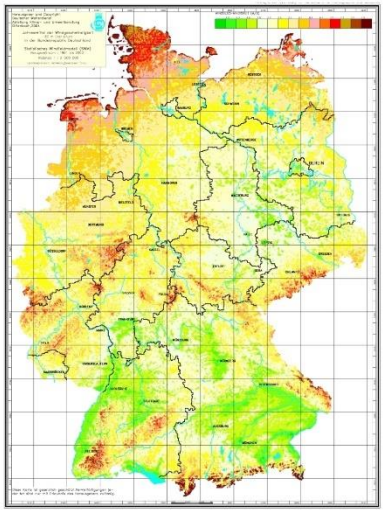
Quelle: CWD

- Betrachtetes System Windenergieanlage
  - Immense Steigerung des Rotordurchmessers, Rotorlasten steigen überproportional mit Rotordurchmesser (Gewicht, Nick- und Giermomente)
  - Häufigstes Konzept: Vier- oder Dreipunktlagerung mit hochübersetzendem Getriebe und schnelldrehendem Generator
  - Höchste Anforderungen an Zuverlässigkeit (≥ 20 Jahre, ≥ 2500 jährliche Volllaststunden Offshore)
  - Insbesondere Offshore immense Kosten bei Schäden am langsam drehenden Triebstrang (z.T. wirtschaftlicher Totalschaden)

# Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA




Quelle: Hau



- Lasten im langsam drehenden Triebstrang von WEA
  - Dynamische, stochastische Lasten in allen sechs Freiheitsgraden an der Rotornabe durch Überlagerungen von Eigengewicht, Anströmung, Turbulenz, Turmdurchlauf etc.
  - Jede Windenergieanlage hat dabei ihre eigene Lasthistorie (Standort, Parkeffekte, Ausfall- und Wartungszeiten) inkl. möglicher Überlasten
  - Zusätzliche Lasten durch Fehlausrichtungen, Regelungsfehler, Unwuchten etc.

# Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA

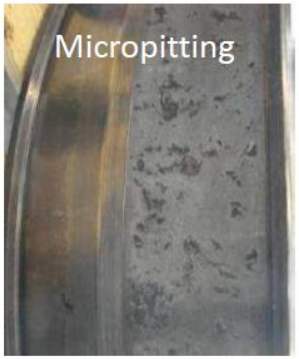
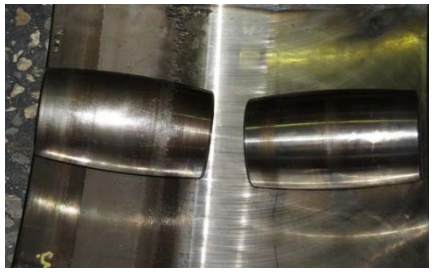


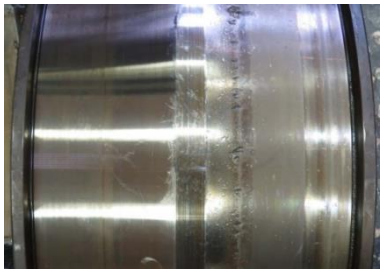
Photo from (Brooks 2013)

Photo from (Brooks 2013)

Photo from (Brake 2013)

Photo from (Brake 2013)





Quelle: van den Heuvel

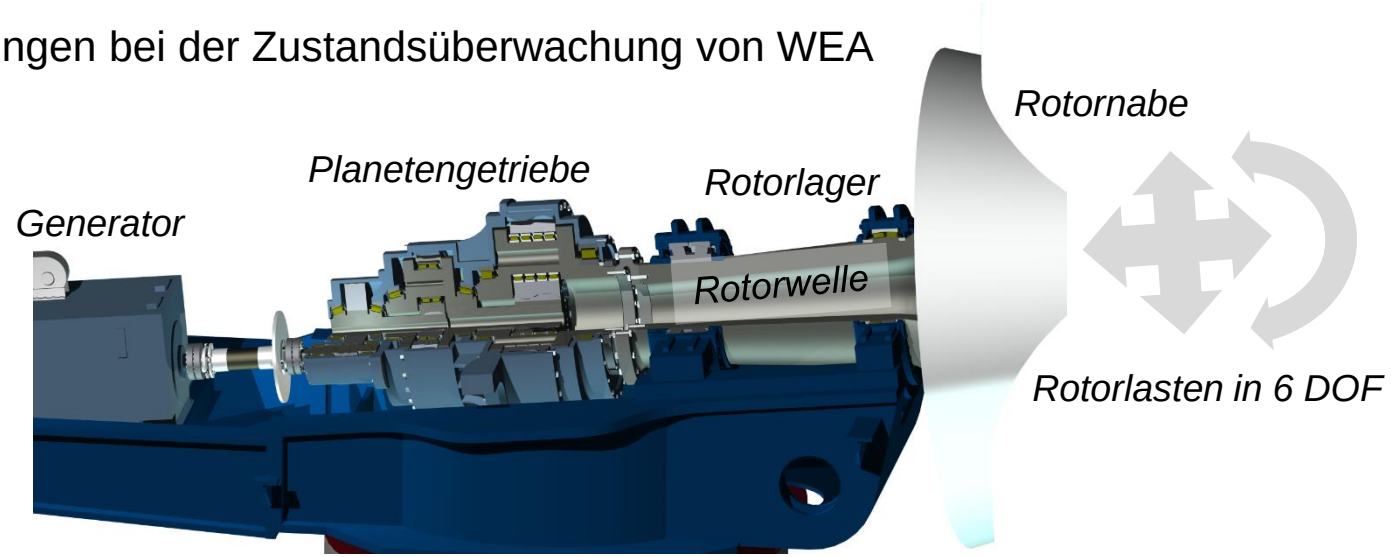
- Schäden im langsam drehenden Triebstrang von WEA
  - Rotorlagerung: üblicherweise fettgeschmierte, doppelreihige Pendelrollenlager, da hohe Wellen-Durchbiegungen
  - Keine Vorspannung: Durch Schubkraft oft nur einseitiges Tragen
  - Hohe Belastungen, schlechte Schmierungszustände
  - Häufige Ausfälle (Lebensdauer im Feld oft < 6 Jahre), immense Reparaturkosten 150 k€ bis > 500 k€ (z.B. Offshore inkl. Produktionsausfall, Kranschiff etc.)

# Gliederung

1. Kurzvorstellung i4M technologies GmbH
2. Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA
3. **Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen**
4. Vorstellung eines beispielhaften Systems
5. Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand
6. Zusammenfassung und Ausblick

# Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen

- Herausforderungen bei der Zustandsüberwachung von WEA




| | | |
|---|---|---|
| Rotordrehzahl | 9 bis 15 | $min^{-1}$ |
| Rotormomente | bis 15 | MNm |
| Rotor-Drehfrequenz (1p) | 0,15 bis 0,25 | Hz |
| Anregungsfrequenz Turmvorstau (3p) | 0,45 bis 0,75 | Hz |
| Schadensüberrollfrequenz Außenring (typ. 3 MW WEA) | 2,2 bis 3,6 | Hz |
| Schadensüberrollfrequenz Innenring (typ. 3 MW WEA) | 2,5 bis 4,2 | Hz |

# Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen

- Sehr niedrige Anregungsfrequenzen (< 5 Hz)
- Dadurch geringe Anregungs- / Stoßenergien
- Periodische Lastschwankungen z.B. durch Unwucht überlagert mit stochastischen Lastschwankungen durch turbulente Windfelder
- Stark schwankende Drehzahlen

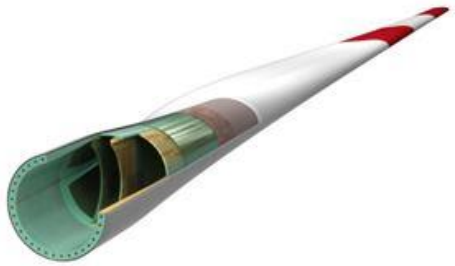
- **Schwierigkeiten in der Schadensdetektion**

- **Unser Ansatz: Von den Symptomen hin zum Verständnis**
  - (Kostenoptimale) Analyse auftretender Lasten
  - Verwendung passender Sensorik für niedrige Frequenzen

| | | |
|---|---|---|
| Schadensüberrollfrequenz Innenring (typ. 3 MW WEA) | 2,5 bis 4,2 | Hz |

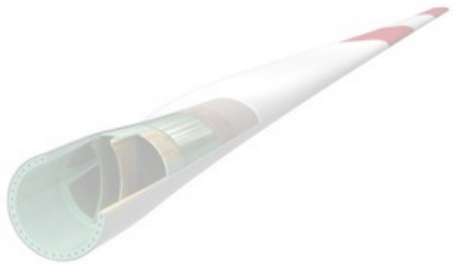
# Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen

- Lasten werden entweder über den Umweg einer Dehnungsmessung oder indirekte Verfahren ermittelt (z.B. elektrisch abgegebene Leistung, Schwingungen, Windgeschwindigkeiten)

| Rotorblätter | Rotorwelle | Turm / Maschinenträger / elektrisch Größen |
|---|---|---|
|  | | |
| • Alle sechs Rotorlastkomponenten sowie Einzellasten der Blätter messbar<br>• Energie- und Datenanschluss an Nabe vorhanden | • Alle sechs Rotorlastkomponenten messbar<br>• Linearer Grundwerkstoff, gute Temperaturkompensation<br>• Mittlere Dehnungsamplituden (geeignet für Dehnungsmesstreifen)<br>• Einfache Zugänglichkeit | • Einfache und kostengünstige Messprinzipien<br>• Messgrößen evtl. schon auf Anlagen vorhanden |
| • Nichtlinearer Werkstoff, Temperaturkompensation schwierig<br>• Hohe Dehnungsamplituden – teure optische Sensorik notwendig<br>• Komplexe Zugänglichkeit | • Komplexer Energie- und Datenanschluss<br>• Einzellasten der Blätter nicht messbar | • Aufgrund starker Nichtlinearitäten ungenau<br>• Meist nur wenige Einzellastkomponenten ermittelbar |

# Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen

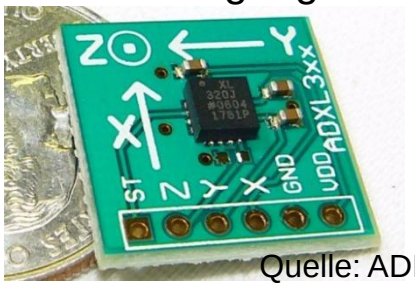
- Lasten werden entweder über den Umweg einer Dehnungsmessung oder indirekte Verfahren ermittelt (z.B. elektrisch abgegebene Leistung, Schwingungen, Windgeschwindigkeiten)

| Rotorblätter | Rotorwelle | Turm / Maschinenträger / elektrisch Größen |
|---|---|---|
|  | | |
| • Alle sechs Rotorlastkomponenten sowie Einzellasten der Blätter messbar<br>• Energie- und Datenanschluss an Nabe vorhanden | • Alle sechs Rotorlastkomponenten messbar<br>• Linearer Grundwerkstoff, gute Temperaturkompensation<br>• Mittlere Dehnungsamplituden (geeignet für Dehnungsmesstreifen)<br>• Einfache Zugänglichkeit | • Einfache und kostengünstige Messprinzipien<br>• Messgrößen evtl. schon auf Anlagen vorhanden |
| • Nichtlinearer Werkstoff, Temperaturkompensation schwierig<br>• Hohe Dehnungsamplituden – teure optische Sensorik notwendig<br>• Komplexe Zugänglichkeit | • Komplexer Energie- und Datenanschluss<br>• Einzellasten der Blätter nicht messbar | • Aufgrund starker Nichtlinearitäten ungenau<br>• Meist nur wenige Einzellastkomponenten ermittelbar |

# Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen

- Drehzahlen der Rotorwelle und Anregungsfrequenzen sehr gering (< 15 $min^{-1}$ = 0,25 Hz)
- Schadensüberrollfrequenzen gering, Anregungen schwach und wenig impulsartig

## MEMS-Beschleunigungssensoren




Quelle: ADI

- Keine untere Grenzfrequenz (Messung der Gravitationsbeschleunigung)
- Digitalisierung direkt am Sensor
- Einfache Messkette nach Sensor
- Kostengünstig

- Niedrige obere Grenzfrequenz
- Geringere Genauigkeit
- Geringere Robustheit
- Mangelndes „Messtechnik-Image“

## Piezo-Beschleunigungssensoren

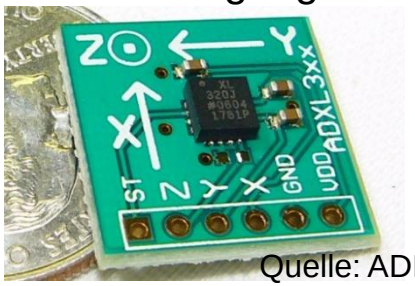
- Industriestandard
- Langjährige Erfahrungen vorhanden
- Hohe Robustheit
- Exzellente Genauigkeit
- Hohe obere Grenzfrequenz

- Prinzipbedingte untere Grenzfrequenz
- Komplexe Messkette nach Sensor
- Digitalisierung (meistens) entfernt vom Sensor
- Teurer

# Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen

- Drehzahlen der Rotorwelle und Anregungsfrequenzen sehr gering (< 15 $min^{-1}$ = 0,25 Hz)
- Schadensüberrollfrequenzen gering, Anregungen schwach und wenig impulsartig

## MEMS-Beschleunigungssensoren




Quelle: ADI

- Keine untere Grenzfrequenz (Messung der Gravitationsbeschleunigung)
- Digitalisierung direkt am Sensor
- Einfache Messkette nach Sensor
- Kostengünstig

- Niedrige obere Grenzfrequenz
- Geringere Genauigkeit
- Geringere Robustheit
- Mangelndes „Messtechnik-Image“

## Piezo-Beschleunigungssensoren

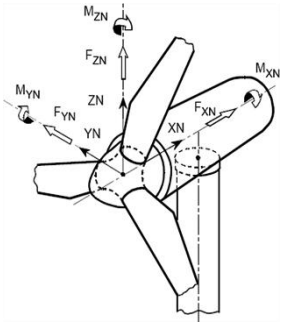
- Industriestandard
- Langjährige Erfahrungen vorhanden
- Hohe Robustheit
- Exzellente Genauigkeit
- Hohe obere Grenzfrequenz

- Prinzipbedingte untere Grenzfrequenz
- Komplexe Messkette nach Sensor
- Digitalisierung (meistens) entfernt vom Sensor
- Teurer

# Gliederung

1. Kurzvorstellung i4M technologies GmbH
2. Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA
3. Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen
4. **Vorstellung eines beispielhaften Systems**
5. Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand
6. Zusammenfassung und Ausblick

# Vorstellung eines beispielhaften Systems



## Lasterfassung

- Dehnungsbasierte Messung von Torsions-, Nick- und Giermomenten an der Hauptwelle
- Angelehnt an IEC 61400-13
- **Rotorlasten als Zeitreihe und Kollektive**

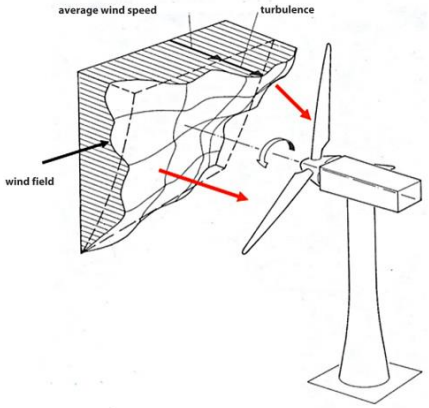
➢ *Performance-Infos*
➢ *Performance-Optimierung (Gierfehler, Parkeffekte etc.)*
➢ *Restlebensdauerabschätzung*

## Condition Monitoring

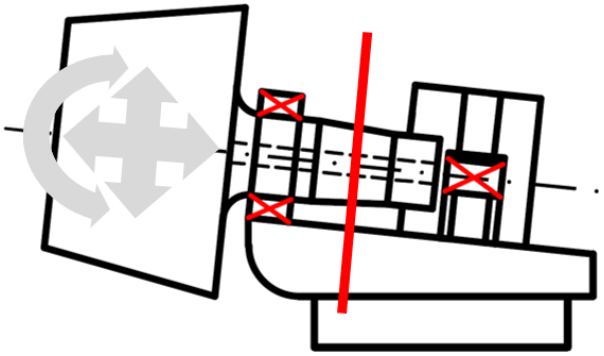
- Mitdrehende Körperschallsensorik
- Drehwinkelsynchrone Auswertung

➢ *Fehlausrichtungen*
➢ *Unwuchten*
➢ *Rotorblattschwingungen*
➢ *Detektion von Schäden an Hauptlagern und erster Getriebestufe*

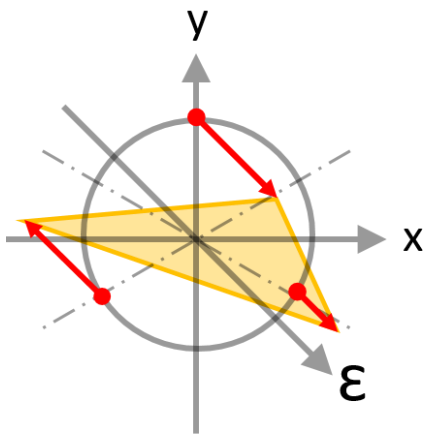
# Vorstellung eines beispielhaften Systems



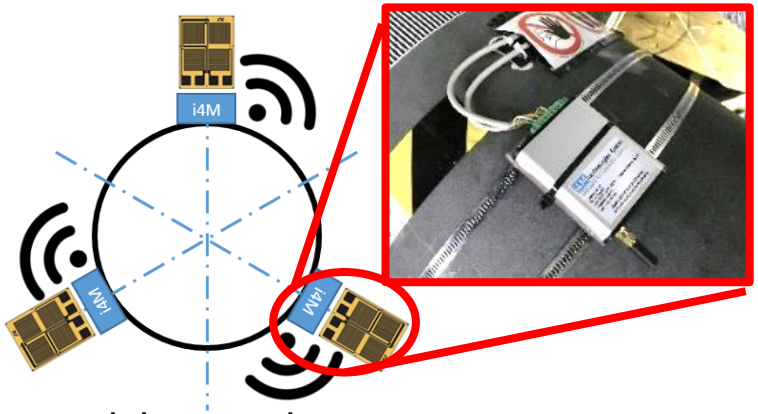

Das turbulente Windfeld führt zu …



… dynamischen Lasten am Rotor und Schnittgrößen in der Welle.




Die Schnittgrößen verursachen Wellenoberflächendehnungen,…

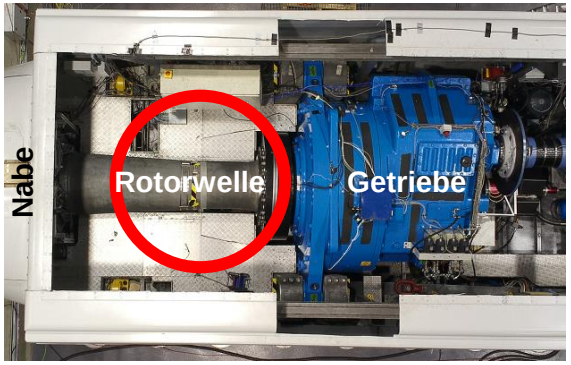



… welche synchron gemessen und drahtlos übertragen werden.

# Vorstellung eines beispielhaften Systems

- **Vorteile des Systems**
  - Batteriebetrieb und drahtlose Datenübertragung, dadurch
    - keine Schleifringe / induktive Übertrager notwendig
    - hohe Signalqualität
  - Lange Laufzeiten bei Verwendung neuester Drahtlosprotokolle (z.B. Bluetooth LE)
  - Keine Verkabelung und Verschaltung auf der großen Welle (Durchmesser > 800 mm) notwendig
  - Erfassung aller sechs Schnittgrößen (Momente und Kräfte) mit nur sechs bereits vorverkabelten, einfach zu applizierenden DMS
  - Ermittlung des Drehwinkels mit Onboard-Mitteln
  - Komplett autonomer Betrieb / Logging möglich

# Vorstellung eines beispielhaften Systems



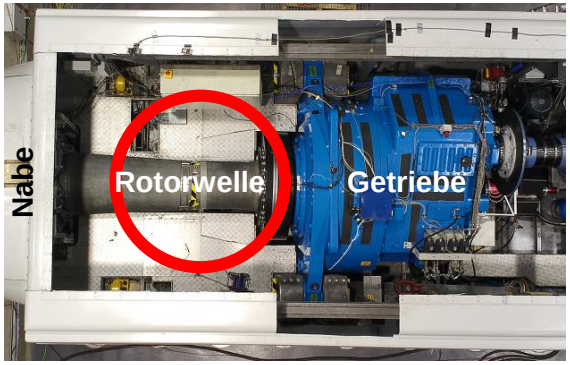
**Mitdrehende Lastsensorik**

- Basierend auf Dehnungsmessstreifen
- Einfach zu installierende DMS
- Montage der Module mittels Spannband
- Abtastraten 10 – 300 Hz
- Ultra Low Noise / Power
- Batteriebetrieben (Laufzeiten bis 1 Jahr)
- Drahtlose Datenübertragung (2,4 GHz)
- Integrierte MEMS Sensorik (mittlere Auflösung) zur Drehwinkelbestimmung

**Mitdrehende Beschleunigungssensorik**

- Basierend auf MEMS Sensorik
- Steife Ankopplung an Rotorwelle mittels Hartkleber
- Abtastraten 500 – 4000 Hz
- Sehr hohe Auflösung (0,038 mm/s²)
- Batteriebetrieben (Laufzeiten bis 1 Jahr)
- Drahtlose Datenübertragung (2,4 GHz)

# Vorstellung eines beispielhaften Systems



**Mitdrehende Lastsensorik**

- Basierend auf Dehnungsmessstreifen
- Einfach zu installierende DMS
- Montage der Module mittels Spannband
- Abtastraten 10 – 300 Hz
- Ultra Low Noise / Power
- Batteriebetrieben (Laufzeiten bis 1 Jahr)
- Drahtlose Datenübertragung (2,4 GHz)
- Integrierte MEMS Sensorik (mittlere Auflösung) zur Drehwinkelbestimmung

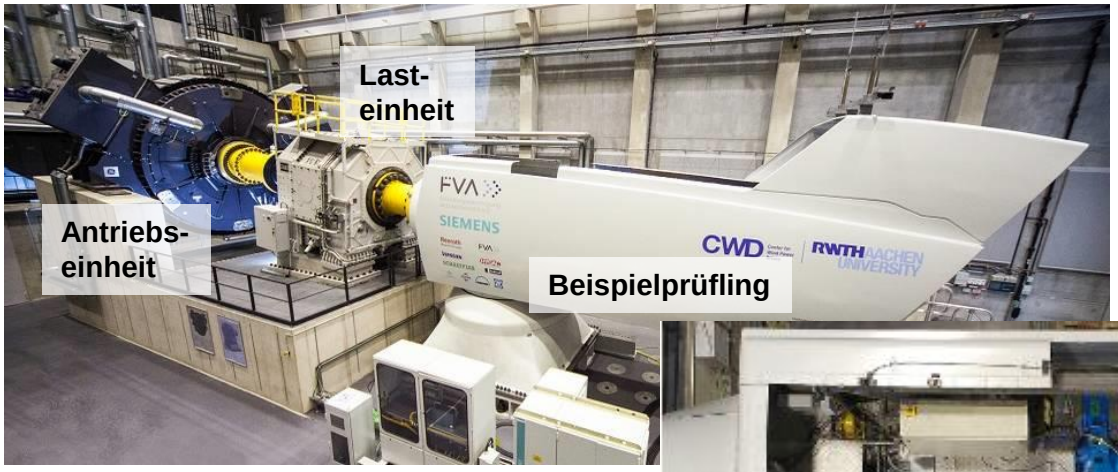
**Mitdrehende Beschleunigungssensorik**

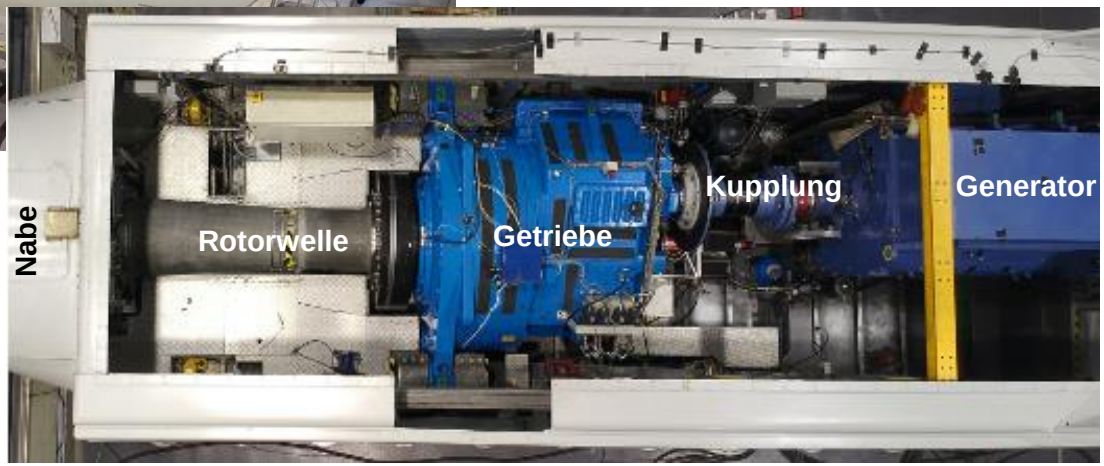
- Basierend auf MEMS Sensorik
- Steife Ankopplung an Rotorwelle mittels Hartkleber
- Abtastraten 500 – 4000 Hz
- Sehr hohe Auflösung (0,038 mm/s²)
- Batteriebetrieben (Laufzeiten bis 1 Jahr)
- Drahtlose Datenübertragung (2,4 GHz)

# Gliederung

1. Kurzvorstellung i4M technologies GmbH
2. Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA
3. Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen
4. Vorstellung eines beispielhaften Systems
5. **Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand**
6. Zusammenfassung und Ausblick

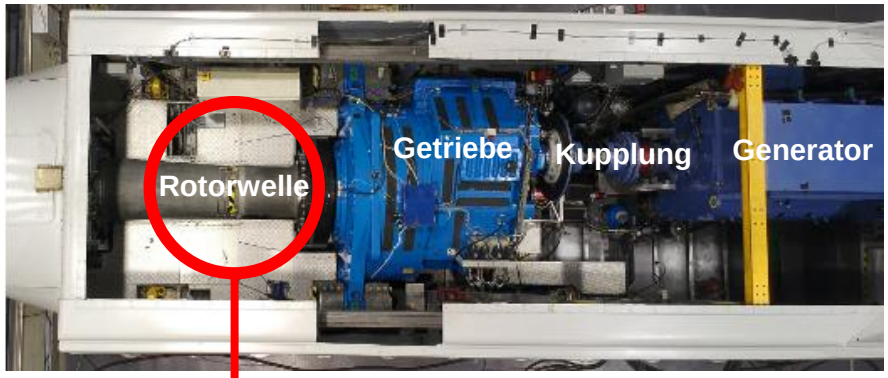
# Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand




- 4 MW Windenergieanlagen Systemprüfstand der RWTH (CWD)
- 3 MW Windenergieanlage mit schnelldrehendem Triebstrang in Dreipunktanordnung

# Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand

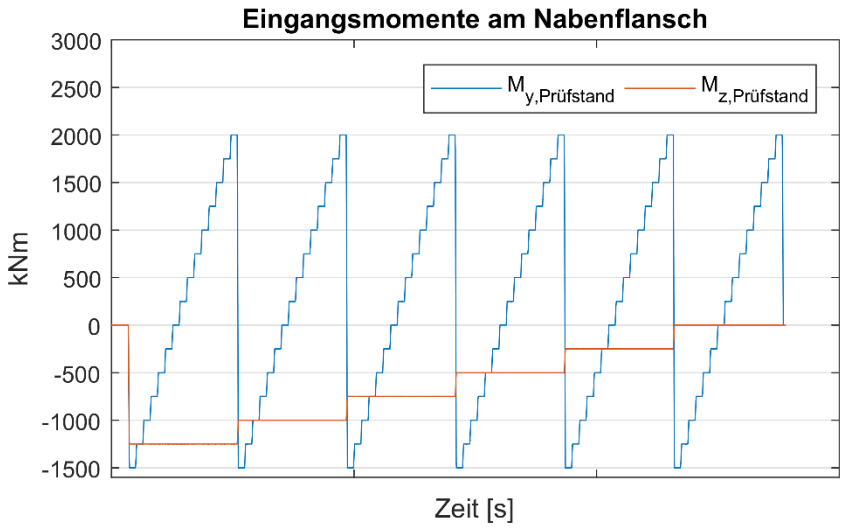


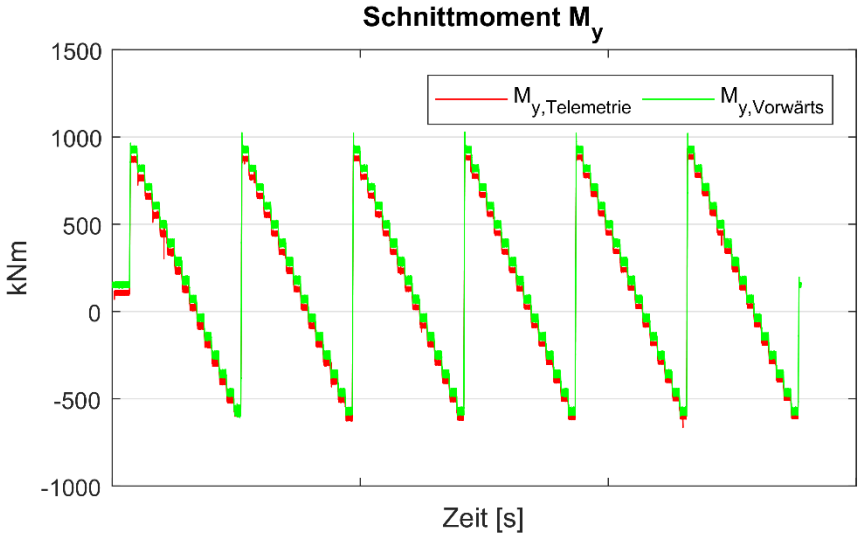

Aufgeprägte Rotorlasten

Umrechnung in Schnittlasten am Messquerschnitt

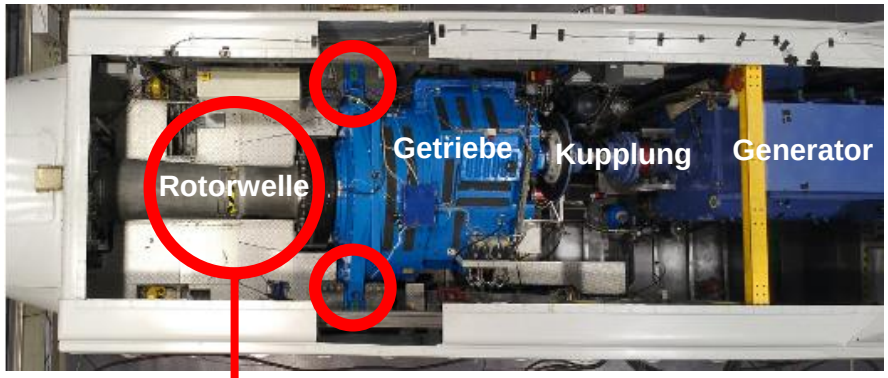
**Vergleich**

Gemessene Schnittlasten



# Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand

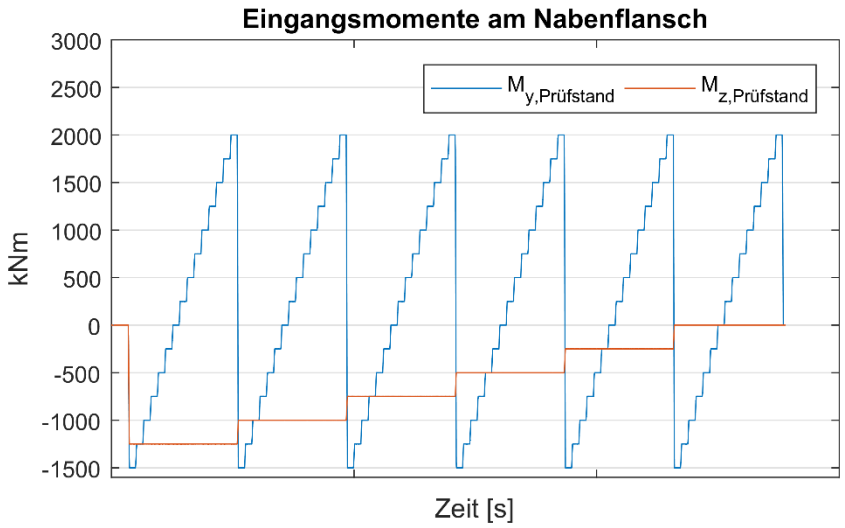


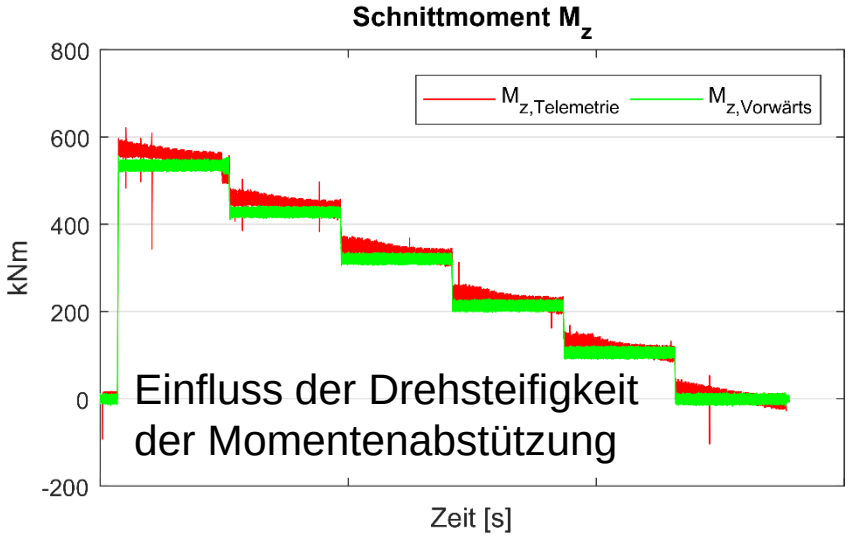

Aufgeprägte Rotorlasten

Umrechnung in Schnittlasten am Messquerschnitt

**Vergleich**

Gemessene Schnittlasten



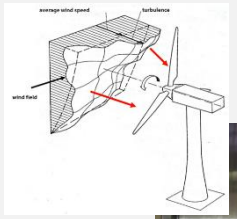



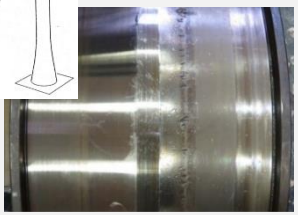
# Gliederung

1. Kurzvorstellung i4M technologies GmbH
2. Lasten und Schadensmechanismen im langsam drehenden Triebstrang von WEA
3. Geeignete Sensorik zur Zustands- und Lastüberwachung auf WEA-Rotorwellen
4. Vorstellung eines beispielhaften Systems
5. Ergebnisse von Messungen auf einem 4 MW WEA-Systemprüfstand
6. **Zusammenfassung und Ausblick**

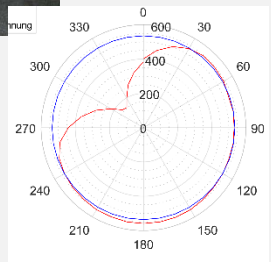
# Zusammenfassung und Ausblick

- Überwachung von WEA-Rotorlasten sinnvoll z.B. zur Beurteilung des Weiterbetriebs sowie zur Detektion von Maschinen- und Regelungsfehlern aber nicht Standard
- WEA-Rotorlagerungen fallen oft vor berechneter Lebensdauer aus
- Fehler an langsam drehenden WEA-Komponenten schwierig zu detektieren





- System zur Last- und Körperschallmessung an WEA-Rotorwellen entwickelt
- Verwendung von MEMS-Sensorik zur Messung nieder-frequenter Schwingungen
- System aktuell im Test auf WEA-Systemprüfstand, Potential zur Detektion von Maschinenfehlern aus Lastdaten aufgezeigt
- Körperschallsignale gegenwärtig in Untersuchung




- Feldtests aktuell laufend
- Weiter Suche nach Entwicklungspartnern
- **Interesse? Sprechen Sie uns an!**

# Kontakt

**Martin Noll**

i4M technologies GmbH
Lochnerstr. 28
52064 Aachen

Tel.:+49 (0)241 56 00 22 00
+49 (0)1590 13 75 242
martin.noll@i4m-tech.de
www.i4m-tech.de

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit