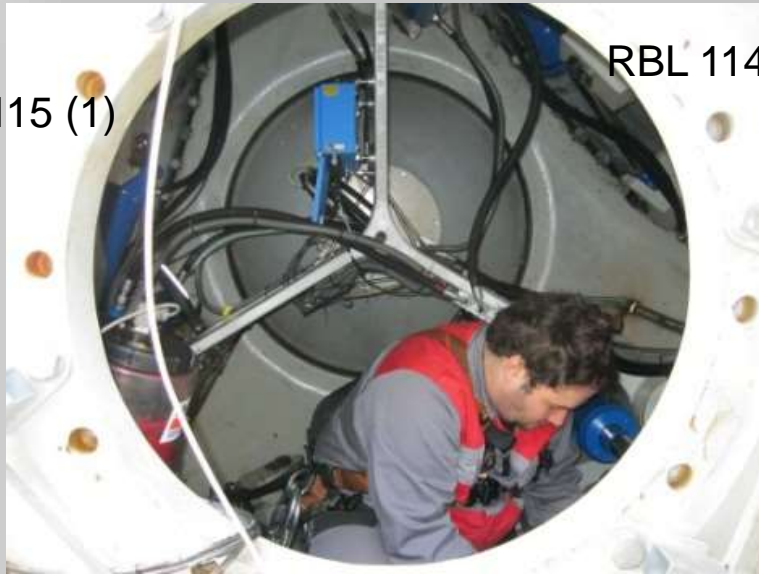


RBL 115 (1)



RBL 114 (2)

RBL 112 (3)

**Dr. Edwin Becker**

Head of Service & Diagnostic Center

**VIBRATION SPECIALIST**  
ISO Cat. III M-2295-01

PRÜFTECHNIK Condition Monitoring  
85737 Ismaning  
info@pruftechnik.com

# Messung von niederfrequenten Schwingungen und Bewegungen

Erfahrungen, Entwicklungen und Beispiele

# Warum niederfrequente Messungen?

## Ziele

- Condition Monitoring an langsam drehenden Triebstrangkomponenten verbessern
- Condition Monitoring in der Nabe und an den Rotorblätter ermöglichen
- SHM (Structural Health Monitoring) an Gondel, Turm und Bauwerksstruktur einführen
- Eigenschwingungs-, Betriebsschwingform- und Bewegungsanalysen ermöglichen
- Turbulenz- und Transienteneinflüsse berücksichtigen
  
- Performanceoptimierung
- Kontrolle Wuchtzustände und Blattwinkel
- Eisdetektion
- Pitchmonitoring
- ...



Rotorblatt Monitoring

Monitoring in der Nabe  
(Pitch, Unwucht, Lager)

Analyse von  
Eigenschwingungen

Bewegungsanalysen  
(ODS)

SCADA Monitoring

Monitoring der ISO  
Schwingkennwerte

Funktionsanalysen

Triebstrang Monitoring

Performance Monitoring

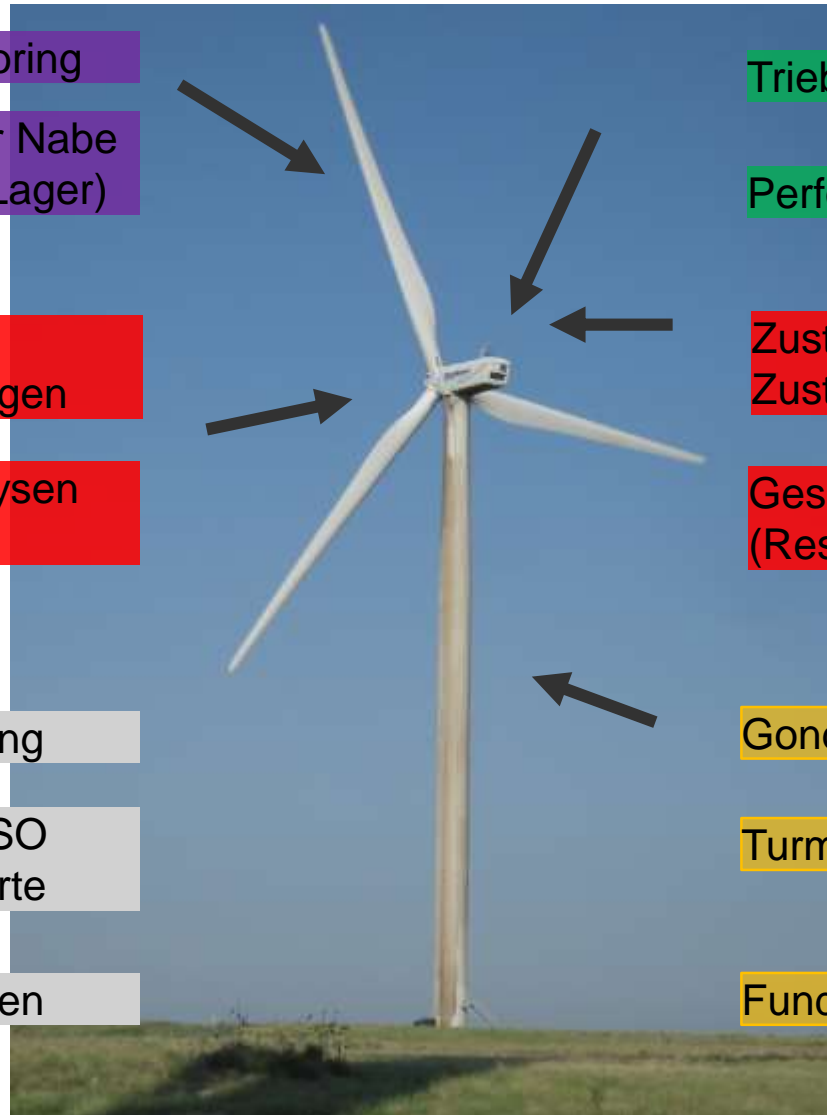
Zustandsdiagnose und  
Zustandsanalyse

Gesundheits-Bewertung  
(Restnutzungsdauer)

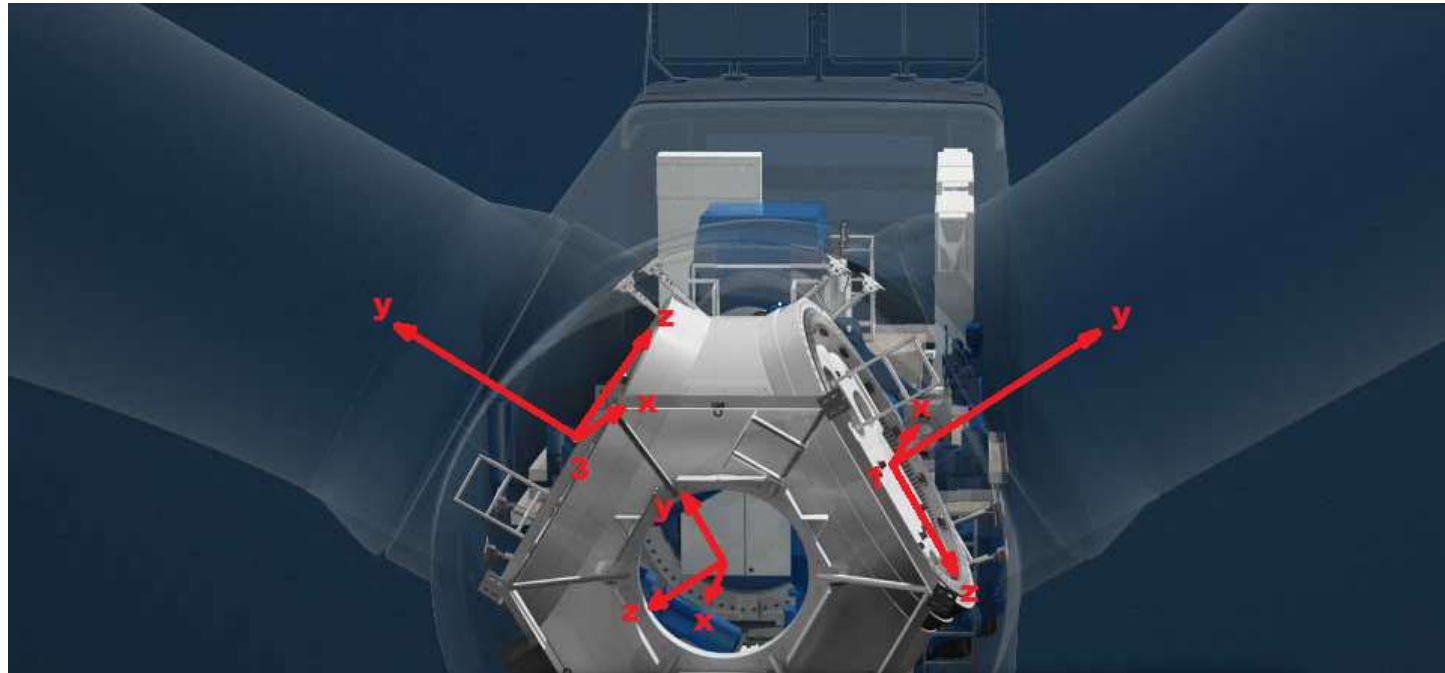
Gondel Monitoring

Turm Monitoring

Fundament Monitoring



# Niederfrequente Messungen in der Nabe



Messpunkt 4 in der Rotornabe

Y... positiv in Umfangsrichtung  
 X... positiv zum Wind  
 Z... in Fliehkrachtrichtung

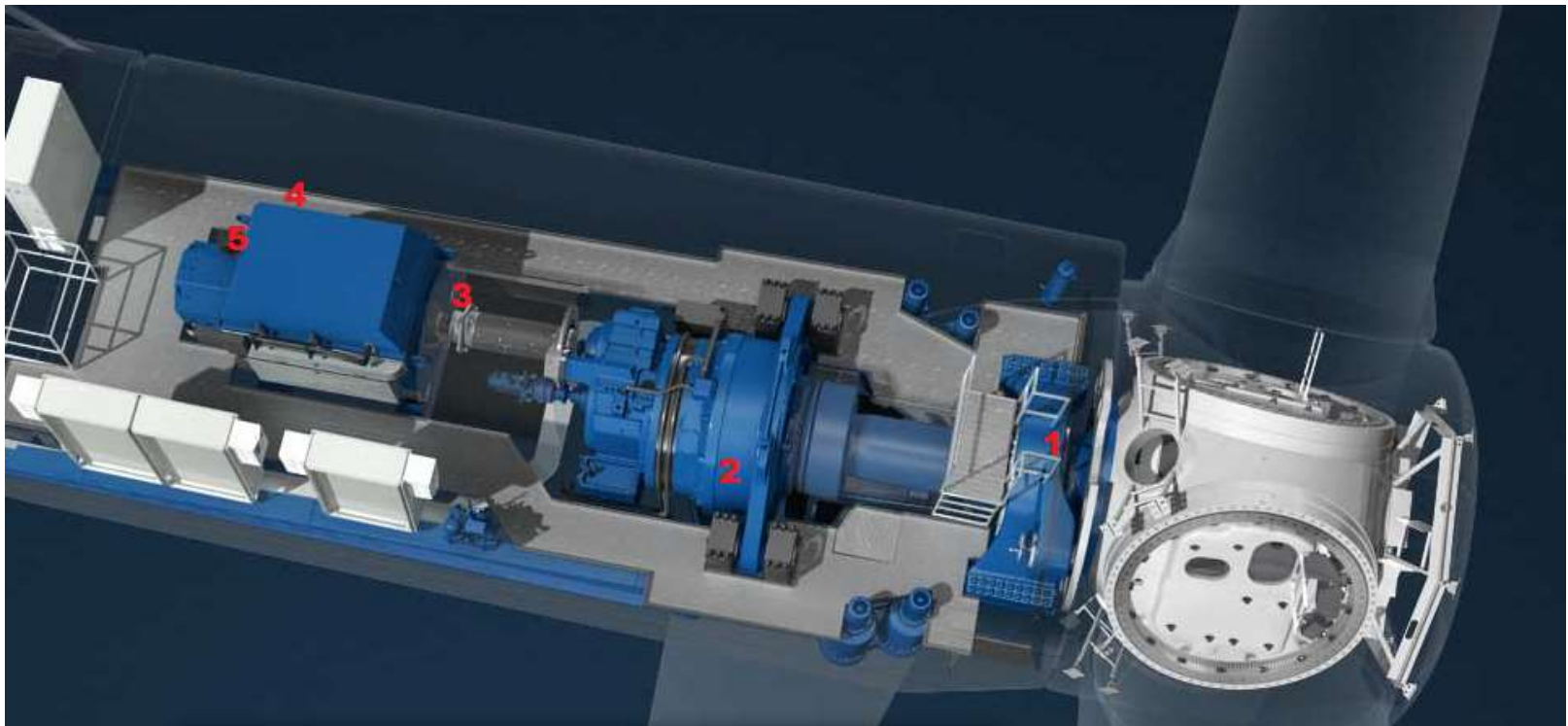
# Niederfrequente Messungen an den Rotorblättern



Messpunkte an den Rotorblättern 1,2 und 3

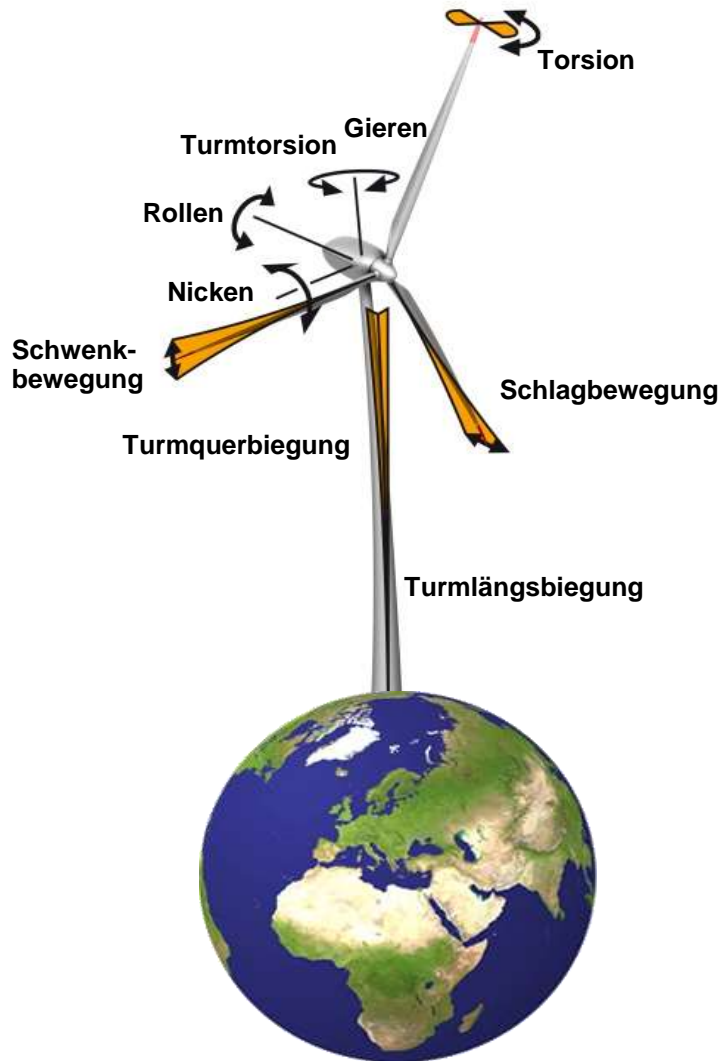
Y... positiv in Fliehkraftrichtung  
 X... positiv mit dem Wind  
 Z... in Umfangsrichtung

# Niederfrequente Messungen in der Gondel und am Grundrahmen



Messpunkte am Gondelrahmen (MP5), am Generator (MP4,3), am Getriebe (MP2) und am Hauptlager (MP1)

# Niederfrequente Messungen an der WEA selbst



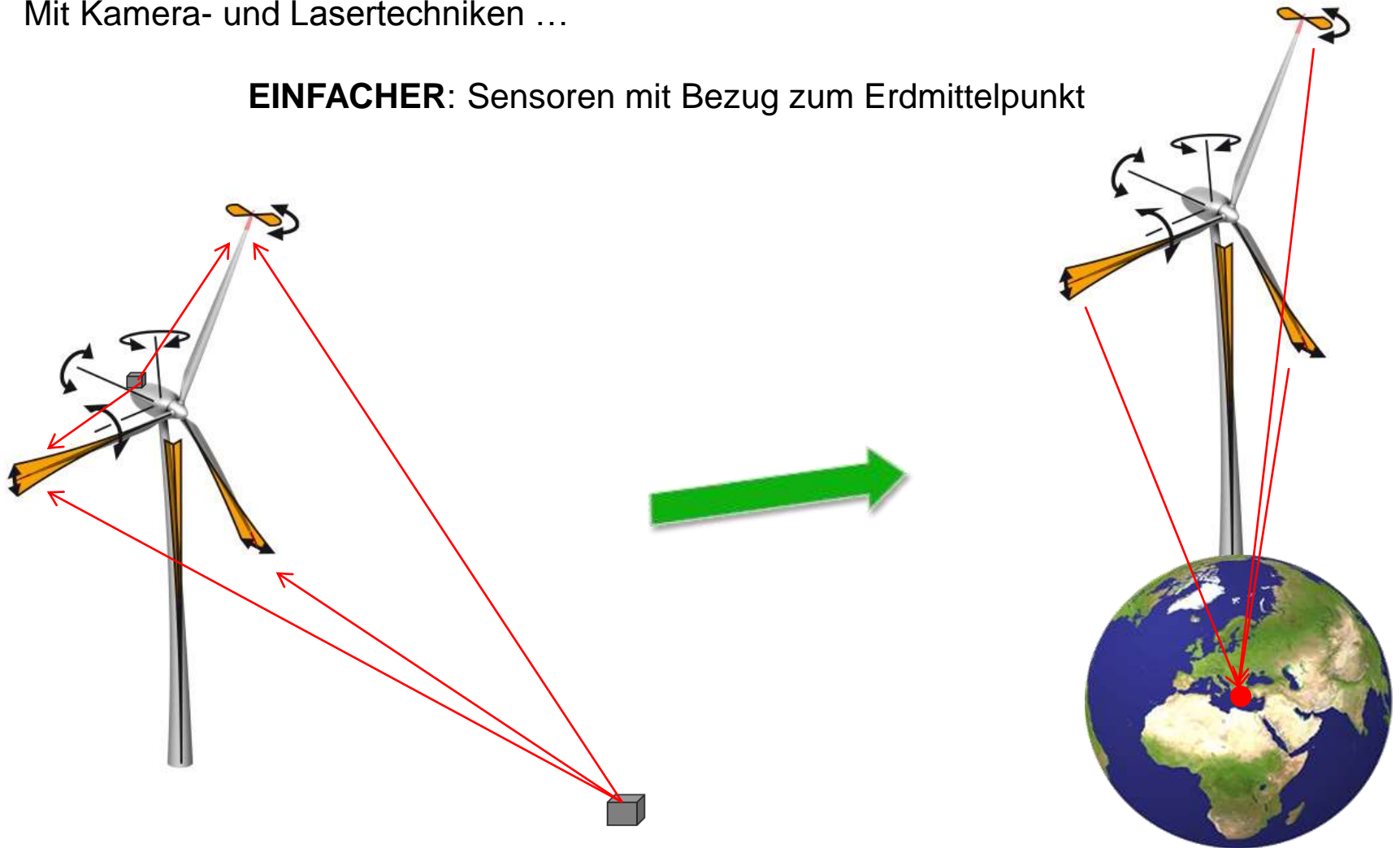
Niederfrequente Schwingungen bedeuten aber auch Bewegungen in Bezug zum Erdmittelpunkt zu messen.

(„statische“ Beschleunigungen, 0 Hz-Beschleunigungen, dynamische Inklination)

# Wie lassen sich solche Bewegungen messen?

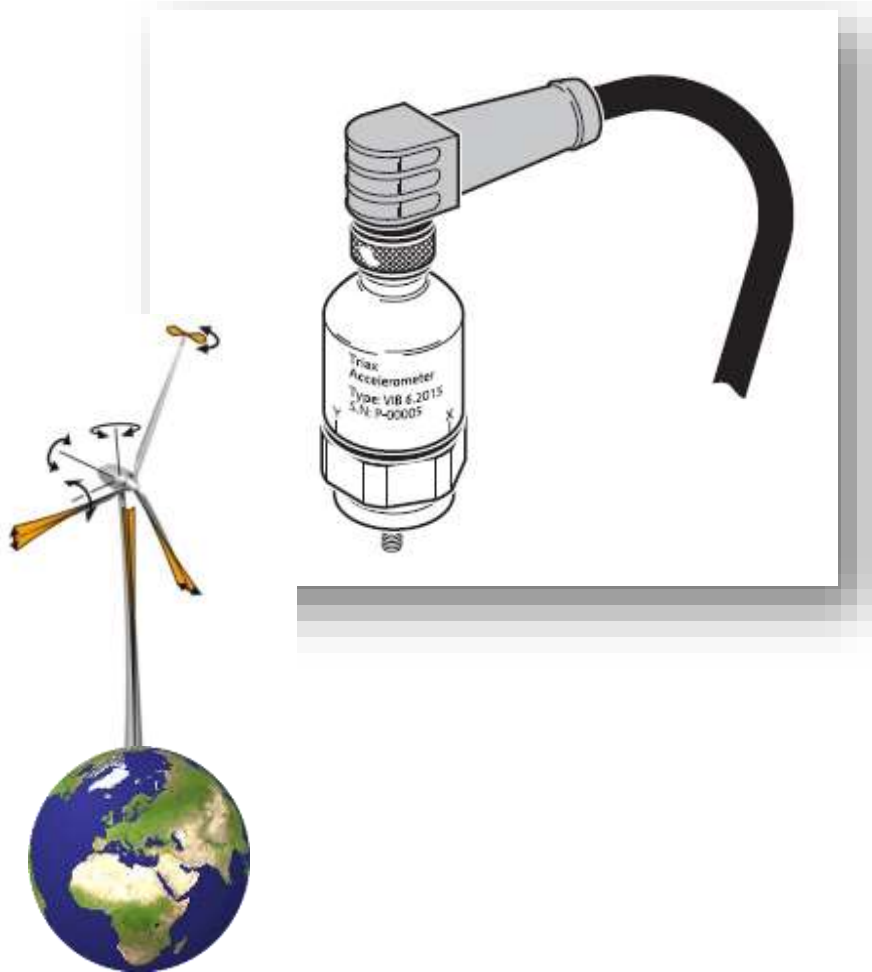
Mit Kamera- und Lasertechniken ...

**EINFACHER:** Sensoren mit Bezug zum Erdmittelpunkt





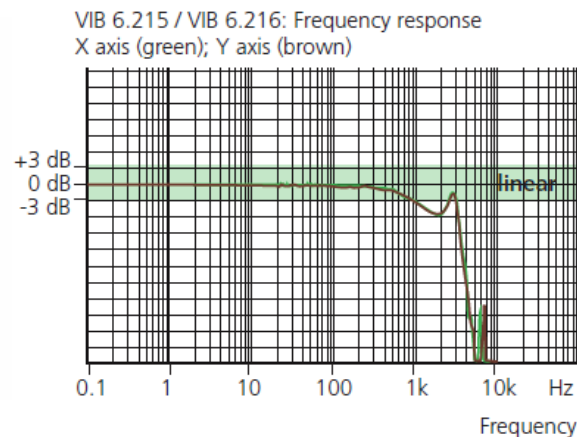
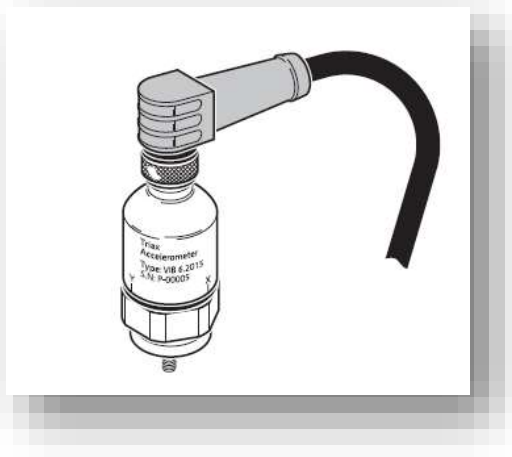
# VIB 6.216- der neue Beschleunigungssensor



| PARAMETER                   |  | VIB 6.215                      | VIB 6.216  |  |
|-----------------------------|--|--------------------------------|--|--|
| Messung                     | Signalsystem   | X / Y<br>Z                     | Spannung<br>ICP  |  |
|                             | Messbereich (0-p)                                    | X / Y<br>Z                     | 19,6 m/s <sup>2</sup><br>400 m/s <sup>2</sup>  |  |
|                             | Übertragungsfaktor                                   | X / Y<br>Z                     | 67 mV/ms <sup>2</sup> , ± 6% @ 159 Hz<br>20 mV/ms <sup>2</sup> , ± 3% @ 159 Hz                     |  |
|                             | Frequenzbereich                                      | X / Y<br>Z                     | 0 Hz ... 1 kHz (± 3dB)<br>1 Hz ... 10 kHz (± 3dB)  | 0 Hz ... 1 kHz (± 3dB)<br>0,1 Hz ... 10 kHz (± 3dB)                |
|                             | Resonanzfrequenz                                     | X / Y<br>Z                     | 2,5 kHz<br>28 kHz  |  |
|                             | Erdbeschleunigungsspannung                           | X / Y                          | ± 660 mV, ± 6%   |  |
|                             | Max. Abweichung vom linearen Mittel bei 360°-Drehung | X / Y                          | ± 2% vom Messwert  |  |
|                             | Ungenauigkeit der Achsenmarkierung                   |                                | < ± 5°   |  |
|                             | Temperatur-Empfindlichkeit                           | X<br>Y<br>Z                    | AC / DC: -0,03% vom Messwert/K<br>AC: -0,03% v. M./K DC: +0,03% v. M./K<br>0,1% v. M./K            |  |
|                             | Temperatursprung-Empf.                               | X / Y<br>Z                     | 0,015 ms <sup>-2</sup> /K<br>3,1 ms <sup>-2</sup> /K   |  |
|                             | Querempfindlichkeit                                  |                                | < 5%   |  |
|                             | Schallempfindlichkeit                                | X / Y<br>Z                     | < 1,5 ms <sup>-2</sup> /mPa<br>< 0,15 ms <sup>-2</sup> /mPa  |  |
| Elektrisch                  | Versorgung   | X / Y<br>Z                     | Versorgung MEMS-Elektronik über Z-Kanal<br>24 VDC / 3-10 mA, ± 10%                                 |  |
|                             | Rauschen   | X / Y                          | 0,0005 ms <sup>-2</sup> /Hz <sup>1/2</sup><br>für 1 Hz ... 1 kHz                                   | 0,0005 ms <sup>-2</sup> /Hz <sup>1/2</sup><br>für 0,1 Hz ... 1 kHz |
|                             | Rauschen   | Z                              | 0,005 ms <sup>-2</sup> bei 1 Hz<br>0,0005 ms <sup>-2</sup> /Hz <sup>1/2</sup> für 10 Hz ... 10 kHz |  |
|                             | Ausgangsimpedanz                                     |                                | 100 Ohm  |  |
| Vorspannung, Ausgang        | X / Y<br>Z   | 1,65 VDC<br>10,5-13,5 VDC      |  |  |
| Umwelt                      | Temperaturbereich                                    |                                | -40°C ... +85 °C   |  |
|                             | Feuchte  |                                | 95%, nicht kondensierend   |  |
|                             | Chemische Beständigkeit, Kabel                       |                                | Öl, Alkohol  |  |
|                             | Schutzgrad mit Kabel                                 |                                | IP 65  |  |
| Maximale Stoßbeschleunigung |  | 100 kms <sup>2</sup> (10000 g) |  |  |
| Mechanisch                  | Gehäusematerial                                      |                                | Edelstahl 1-4305   |  |
|                             | Befestigung  |                                | Klebung  |  |
|                             | Anschluss  |                                | 4-poliger M12-Kabelstecker mit A-Kodierung   |  |
|                             | Gewicht  |                                | 62 g   |  |

# Was ist bei solch neuem Sensor zu beachten?

- Sensorspezifikationen und Kennfelder verstehen
- Geeignete Kalibrierungsmaßnahmen finden
- Feldmessungen zur Validierung erforderlich
- Konfigurations- und Auswerteverfahren schaffen
- Einfache Montagemöglichkeiten und gleiche Empfindlichkeiten



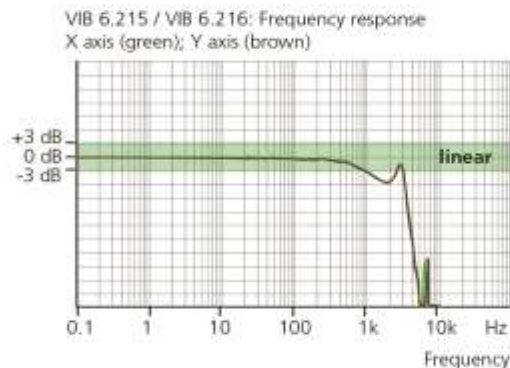
# Beschreibung zum Sensor

Der neue PRÜFTECHNIK-Sensor misst **LINEAR** niederfrequente Beschleunigungen ab 0 Hz und Schwingbeschleunigungen bis 36 kHz.

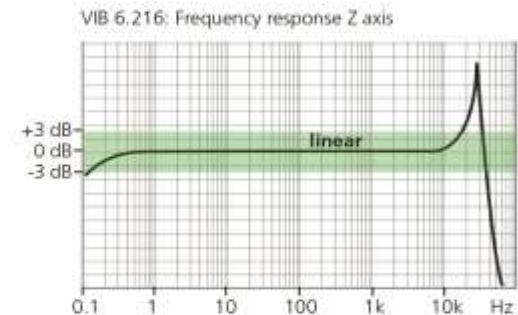
Er kombiniert Vorteile der bewährten **Tandem-Piezo** Technologie mit der **MEMS**-Technologie.

Ein Beschleunigungssensor für:

- Maschinendiagnosen in x-, y-, z-Richtung
- Hochfrequente Beschleunigungs- und Wälzlagerdiagnosen in z-Richtung
- Richtungsabhängige Bewegungsanalysen in x- und y- Richtung



Ansicht vom Sensor



## Bedeutung der Messkette

- Empfindliche Sensoren allein genügen nicht, um niederfrequente Schwingungen exakt zu messen.
- In neuesten Normen ist definiert, dass die gesamte Messkette mit maximal 2 dB Ungenauigkeit im spezifizierten Frequenzbereich arbeiten sollte.
- Die Messkette besteht aus dem Schwingungssensor, der Messhardware und der Messsoftware.
- Es beginnt also bei der AD Wandlung und geht über zur Messwertverarbeitung bis hin zur Integration, um die Schwinggeschwindigkeit zu erhalten.

### **Fazit:**

Hard- und Software Hersteller benötigen zum Funktions- und Qualitätsnachweis geeignete Prüf- und Kalibriereinrichtungen, und nicht nur elektronisch.

# Wie präzise ist die Messtechnik?

PRÜFTECHNIK verwendet zur Kalibrierung und im Rahmen der Qualitätssicherung einen eigenen 3-Achsen-Bewegungssimulator.

Damit kann man bei frei einstellbaren Drehraten, Frequenzen, Signalverläufen und Verfahrkennfelder sehr präzise drehen, positionieren, wobbeln, verkippen, schwenken und pitchen.

Eine besondere Herausforderung stellt bei solchen niederfrequenten Schwingungen die Ermittlung der Schwinggeschwindigkeit in mm/s dar.

Warum?

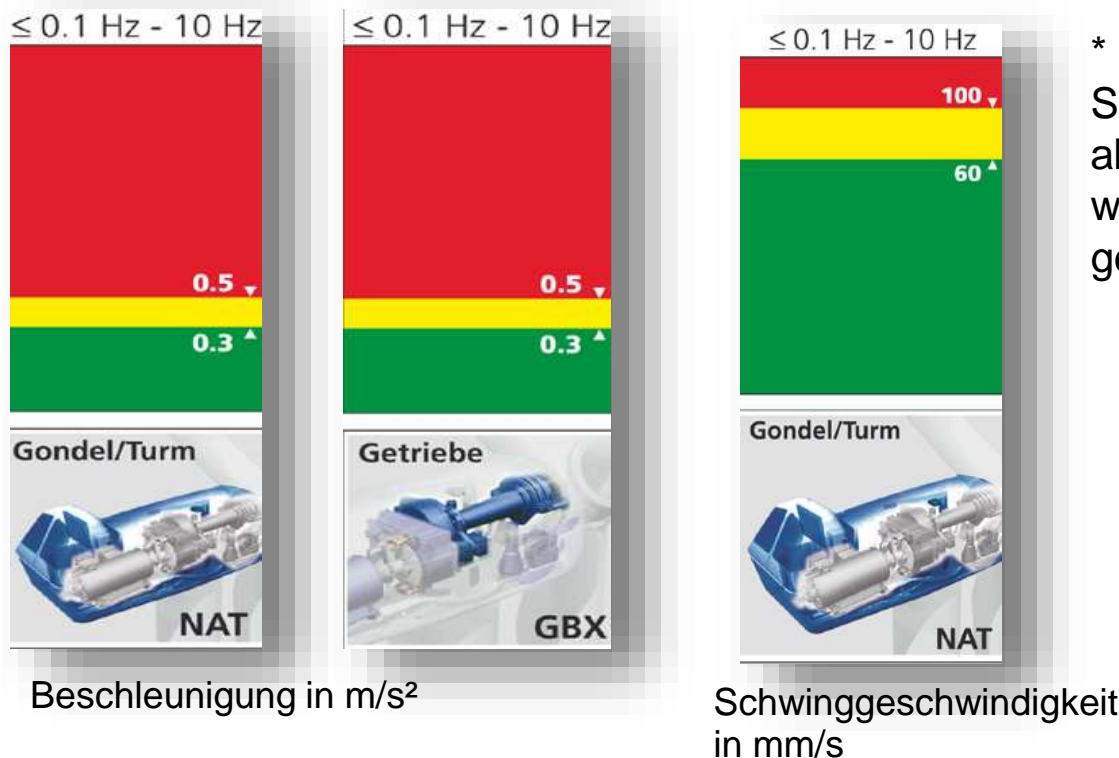
Einige technische Daten vom 3-Achsen - Bewegungssimulator der PRÜFTECHNIK AG



|                           | ROLL, inner axis            | PITCH, middle axis         | YAW, outer axis            |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Orthogonality             | 5 arc sec                   |                            | 5 arc sec                  |
| Wobble                    | 5 arc sec                   | 5 arc sec                  | 5 arc sec                  |
| <b>Dynamic Parameters</b> |                             |                            |                            |
| Angular freedom           | continuous                  | continuous                 | continuous                 |
| Positioning accuracy      | 1 arc sec RSS               | 1 arc sec RSS              | 1 arc sec RSS              |
| Position resolution       | 0.00001 deg                 | 0.00001 deg                | 0.00001 deg                |
| Rate range                | +/-800 deg/sec              | +/-400 deg/sec             | +/-300 deg/sec             |
| Rate resolution (command) | 0.00001 deg/sec             | 0.00001 deg/sec            | 0.00001 deg/sec            |
| Rate accuracy             | 0.0010%                     | 0.0010%                    | 0.0010%                    |
| Installed torque          | 930 Nm                      | 2'900 Nm                   | 15'000 Nm                  |
| Inertia no load           | 2.5 kgm <sup>2</sup>        | 45 kgm <sup>2</sup>        | 290 kgm <sup>2</sup>       |
| Acceleration, no load     | 20'000 deg/sec <sup>2</sup> | 3'500 deg/sec <sup>2</sup> | 2'750 deg/sec <sup>2</sup> |
| Bandwidth (-3dB)          | 80 Hz                       | 22 Hz                      | 40 Hz                      |

# Niederfrequente Schwingungen normgerecht messen

Laut VDI 3834 und ISO DIS 10816-21 sind im Frequenzbereich 0,1 Hz-10 Hz die Schwingungen mit **linearen\* Beschleunigungssensoren** zu messen und sowohl die Schwingbeschleunigungen in  $m/s^2$  als auch die **Schwinggeschwindigkeiten in  $mm/s$**  zu bewerten.



\* Bei nicht linearen Sensoren und nicht abgeglicher Messtechnik werden Amplituden zu gering gemessen.

# Messungen am 3-Achsen-Bewegungssimulator



**Äußere Achse (Yaw)** → blieb vorerst stehen

**Mittlere Achse** → simuliert den Rotor mit konstanten Drehzahlen (6,9,12,14.4 und 16.8 U/min). Auch Störfrequenzen lassen sich überlagern.

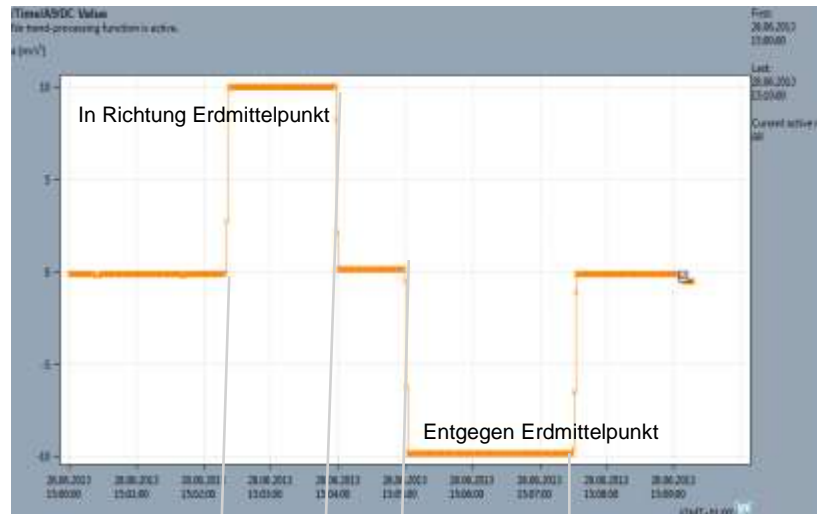
**Innere Achse** → kann verschiedene Pitchpositionen und überlagerte Zusatzbewegungen z.B. in einer WEA simulieren.

**Zusätzlich:  
Ausführen von  
Positionierungsvorgängen**  
(für statische Beschleunigungen bezogen auf den Erdmittelpunkt)

# Bewegungssimulator: Anfahren verschiedener Positionen

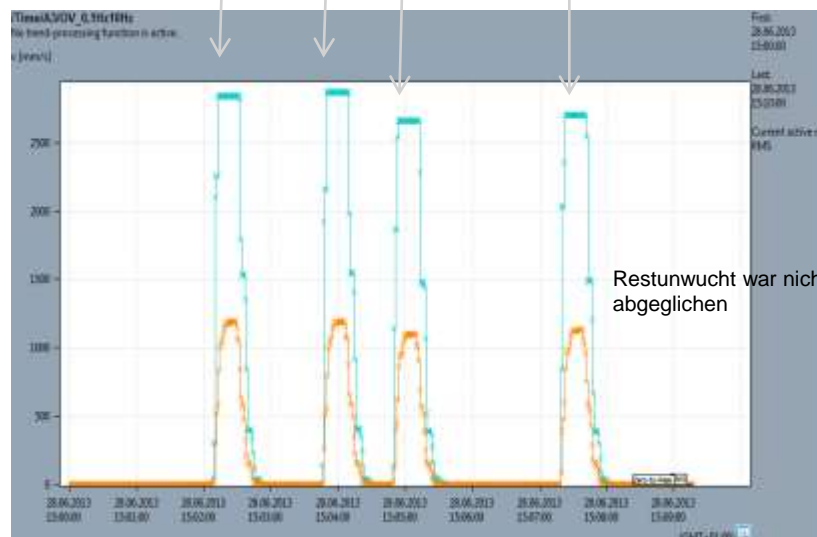
Abhängigkeiten Beschleunigung / Schwinggeschwindigkeitskennwert

“Statische”  
Beschleunigung



Schwing-  
geschwindigkeits-  
kennwert

V @0,1 Hz-10 Hz



## Fazit:

Neben den jeweiligen Positionen in Bezug zum Erdmittelpunkt lassen sich auch über die Schwinggeschwindigkeit  $v @0,1 \text{ Hz}-10 \text{ Hz}$  Schwingbeanspruchungen beim Verfahren messen. Sogar Restunwuchten sind erkennbar.



## Ziel

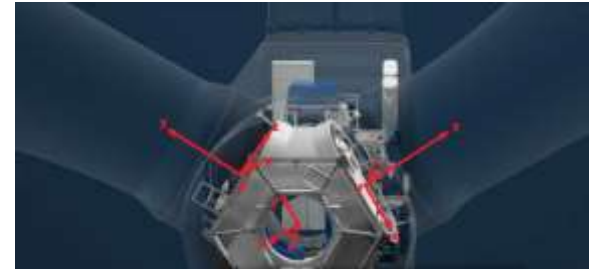
Analyse des niederfrequenten Bewegungsverhaltens des Hauptrotors mit den Rotorblättern in Bezug zum Erdmittelpunkt

## Messtechnik

- Hybride triaxiale Beschleunigungssensoren (Anbringung in die drehende Nabe und an den Rotorblättern)
- VIBGUARD mit WLAN in der drehenden Nabe

## Mögliche Messungen

- Rotor- und Rotorblattbewegungen
- Rotor- und Rotorblattschwingungen
- Rotorblattpositionen
- Eisdetektion und Blattwinkelkontrolle



Montage in der Gondel

# Niederfrequente Bewegungs- und Schwingungsanalysen in der Gondel

## Ziel

Analyse des niederfrequenten Bewegungsverhaltens des Turmes, der Gondel, des Generators und des Getriebes in Bezug zum Erdmittelpunkt

## Messtechnik

- Hybride triaxiale Beschleunigungssensoren
- VIBGUARD in der Gondel und Übertragung zur PRÜFTECHNIK Cloud

## Mögliche Messungen

- Gondel- Getriebe- und Generatorbewegungen
- Schwingungsanalysen
- Transientenanalysen



Einige Messpunkte in der Gondel

# Anfahrvorgang in Fliehkraftrichtung

Beispiel: Sensor am Rotorblatt 3 in Fliehkraftrichtung und Generatordrehzahl



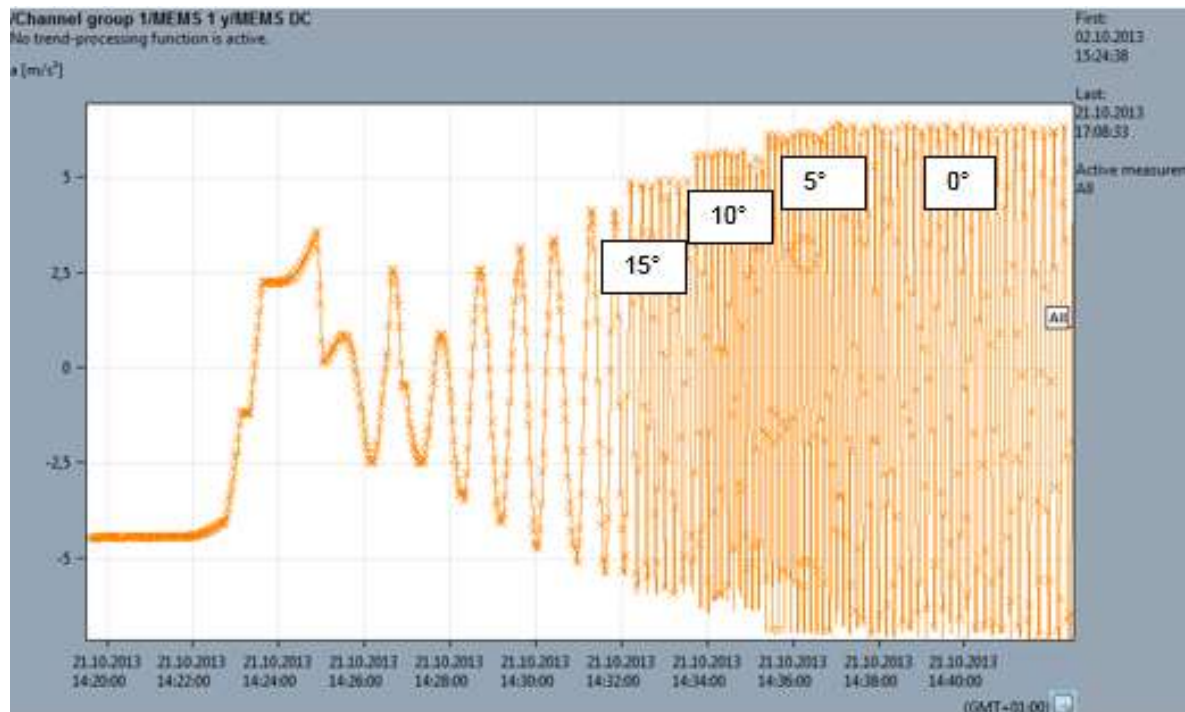
- + 1g → Rotorblatt 3 bewegt sich nach unten
- - 1g → Rotorblatt 3 bewegt sich nach oben
- Zusatzbeschleunigungen und Verkippungen im Bezug zur Schwerkraft wirken sich durch vektorielle Veränderungen aus

## Fazit:

Messtechnische Veranschaulichung wie gleichmäßig der Rotor mit den Rotorblättern trudelt, anläuft, beschleunigt und verkippt

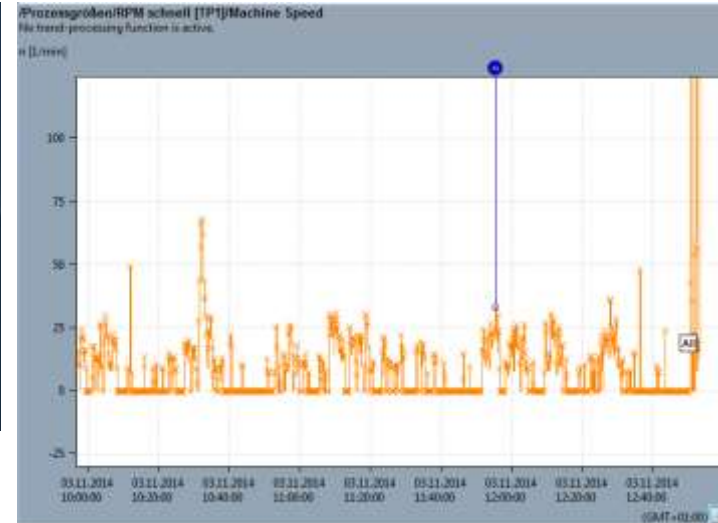
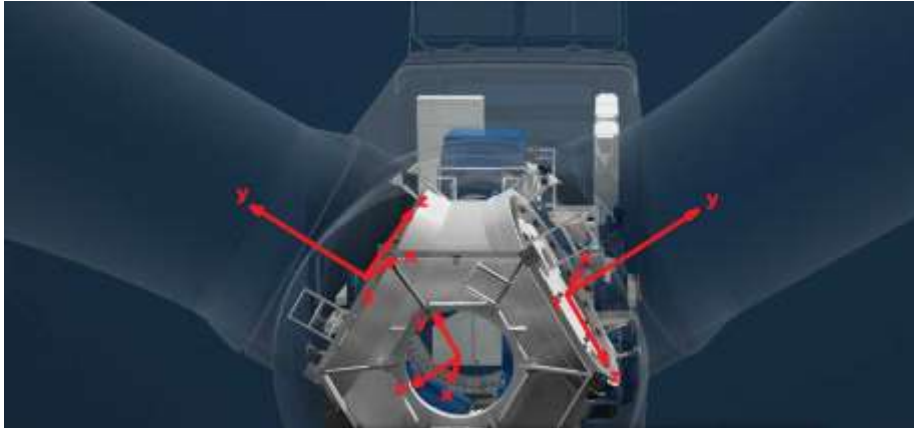
# Anfahrvorgang in Windrichtung

Wird die zweite Achse des triaxialen Beschleunigungssensors in Windrichtung montiert, lassen sich Bewegungen und Schwingungen in Windrichtung messen, vergleichen und diagnostisch überwachen.



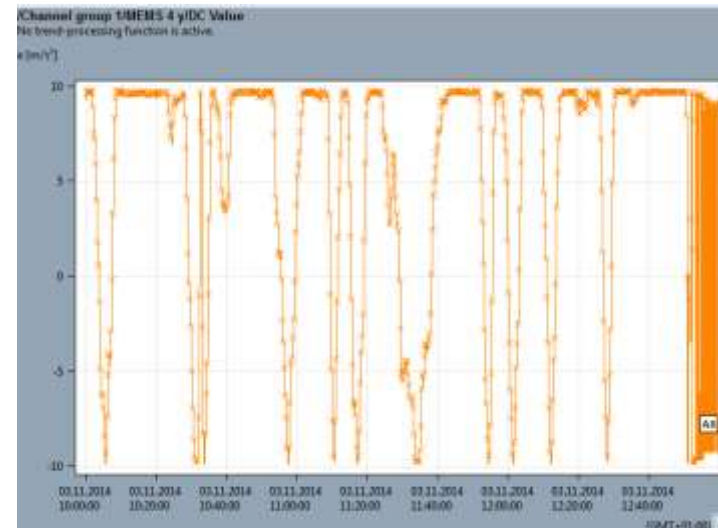
Einfluss des Pitchwinkels auf die Bewegungen in Windrichtung

# Auffälligkeit beim Trudeln der WEA

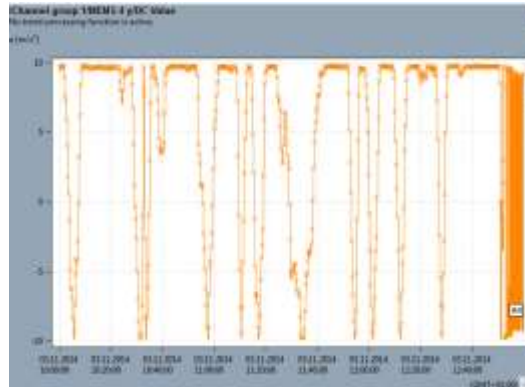


Drehzahl des Generators am 03.11.14 10 Uhr- 13 Uhr

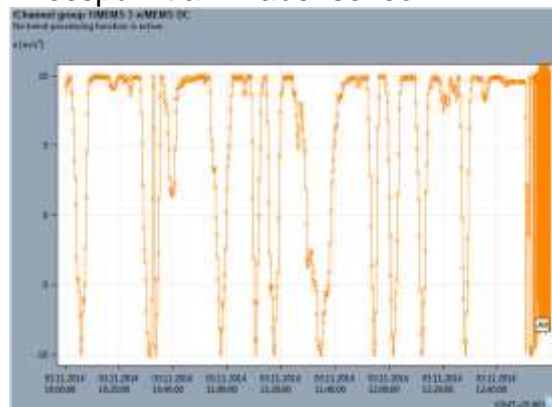
Auffälligkeit aus dem Nabensensor:  
Ein Rotorblatt scheint schwerer zu sein



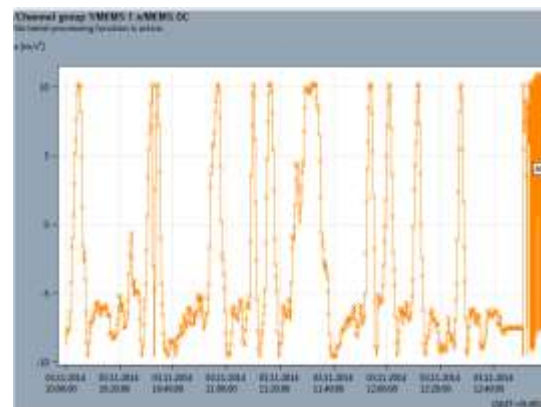
# Analyse der Auffälligkeit beim Trudeln



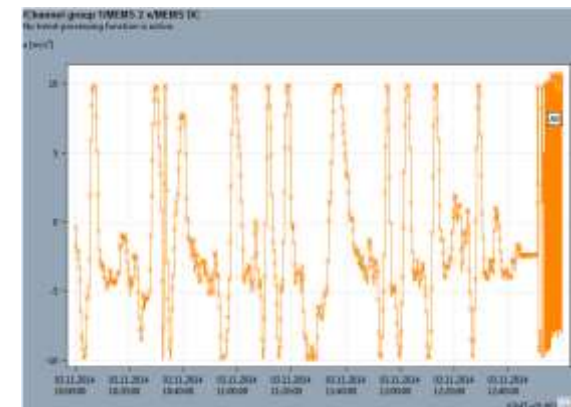
Messpunkt am Nabensensor



Messpunkt an Rotorblatt 3



Messpunkt an Rotorblatt 1



Messpunkt an Rotorblatt 2

## Fazit:

Rotorblatt 3 bleibt beim Trudeln länger unten stehen, es ist schwerer

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**VIBROWEB XP**  
Online CMS



**VIBXPERT II**  
Mobiles CMS



**ROTALIGN Ultra**  
Ausrichtsystem



**Jetzt mit GL Zertifizierung**

**VIBGUARD XP,**  
Advanced Online CMS



[pruftechnik.com/conwind](http://pruftechnik.com/conwind)  
[telediagnose.com](http://telediagnose.com)