



# Ermittlung der maßgebenden Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemissionen



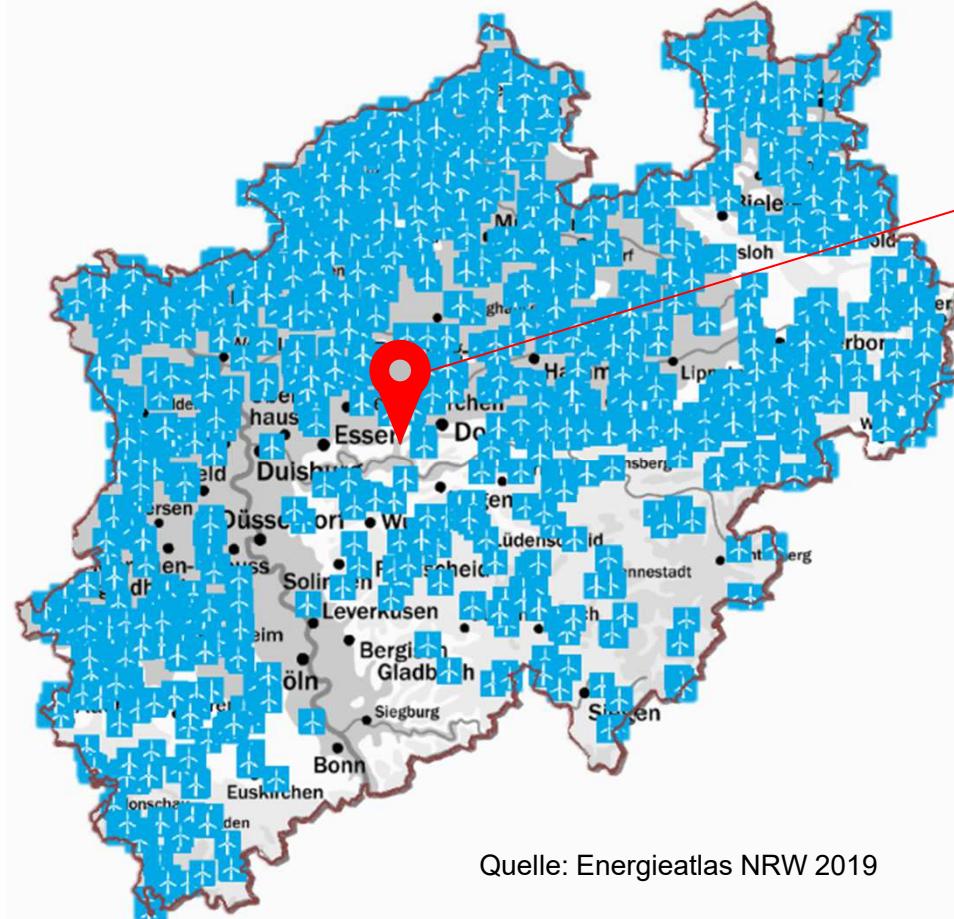
MISS-Projekttreffen  
01.10.2019

Dr.-Ing. Michael Mistler  
Dipl.-Ing. Philipp Meckbach



## Bürovorstellung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH



BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

Bergstraße 174  
44807 Bochum  
[www.baudynamik.de](http://www.baudynamik.de)



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 2



EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



## Bürovorstellung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH



Industrie



Menschen



Schwingungsempfindliche  
Geräte

# Schwingungen & Erschütterungen



Baustelle



Verkehr



Messtechnische  
dynamische  
Untersuchungen

## Schwingungsmessungen

Monitoring

Bemessung

Gebrauchstauglichkeit

Berechnung

Prognose

dyn. Systemerregung



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 3



EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



# Bürovorstellung



## Sachverständigentätigkeit

- Öffentlich bestellter und vereidigter SV
- Gutachter Eisenbahn-Bundesamtes (EBA)



## DAkkS-akkreditiert für Schwingungsmessungen

- Messstelle nach BImSchG §29b



## Lehraufträge

- Ruhr-Uni Bochum (Prof. Dr.-Ing. Heiland)
- RWTH Aachen (Dr.-Ing. Mistler)
- Diverse Fortbildungsseminare (Haus der Technik, Ingenieurakademie)



## Mitarbeit Normausschüsse

- DIN (u.a. DIN45669, DIN45673, DIN4150)
- VDI-Richtlinien (u.a. VDI2038)



## Mitgliedschaften

- u.a. DGEB (Vorstand), DGE, VDI

**BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER**  
GmbH

- 6 Bauingenieure (Dipl.-Ing. / Dr.-Ing.)
- 2 CAD Konstrukteure
- 1 Elektro-/Messtechniker
- 1 Technische Sachbearbeiterin
- 1 Werkstattleiter
- 1 Buchhaltung
- Mess-Hilfskräfte nach Bedarf



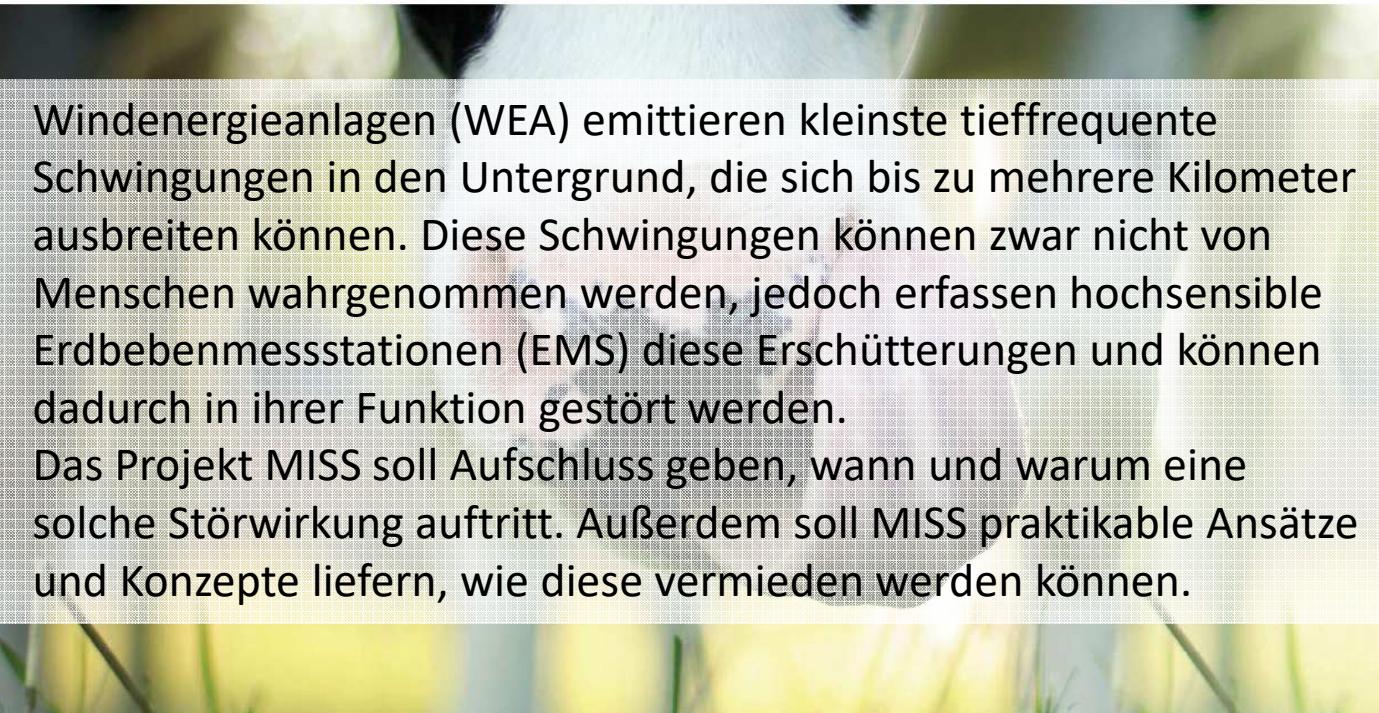
EFRE.NRW

Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 4

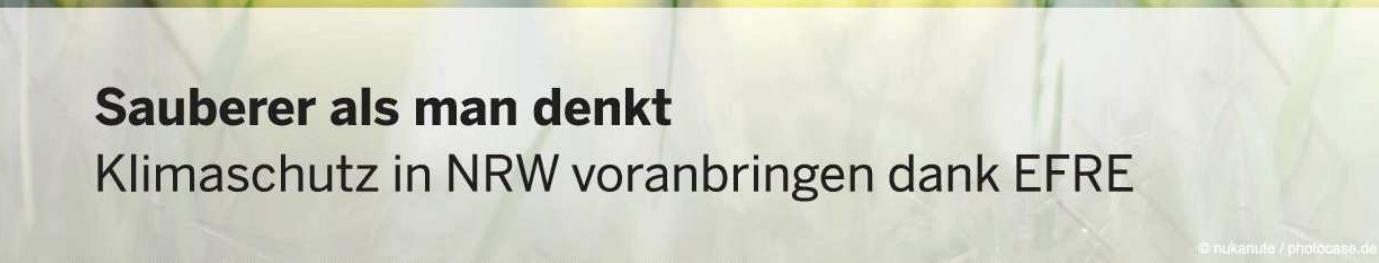


EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



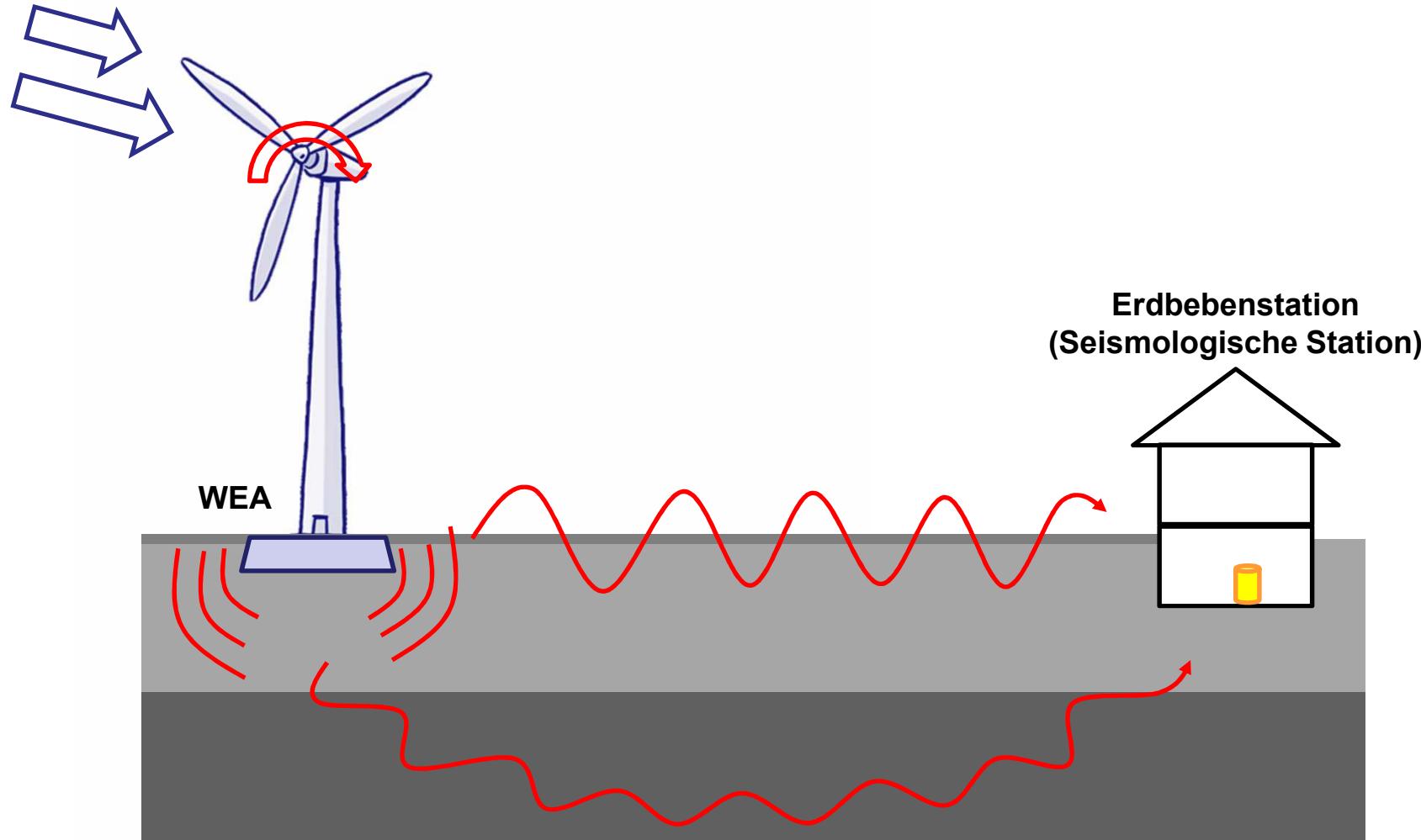
Windenergieanlagen (WEA) emittieren kleinste tieffrequente Schwingungen in den Untergrund, die sich bis zu mehrere Kilometer ausbreiten können. Diese Schwingungen können zwar nicht von Menschen wahrgenommen werden, jedoch erfassen hochsensible Erdbebenmessstationen (EMS) diese Erschütterungen und können dadurch in ihrer Funktion gestört werden.

Das Projekt MISS soll Aufschluss geben, wann und warum eine solche Störwirkung auftritt. Außerdem soll MISS praktikable Ansätze und Konzepte liefern, wie diese vermieden werden können.



**Sauberer als man denkt**  
Klimaschutz in NRW voranbringen dank EFRE

© nukanuto / photocase.de





### AP 1.1

Ermittlung der Schwingungs-eigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungs-emission

### AP 1.2

Prognose der Schwingungs-emissionen am Turmfuß

...

### AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle

# Ursache

# Prognose

# Minderung



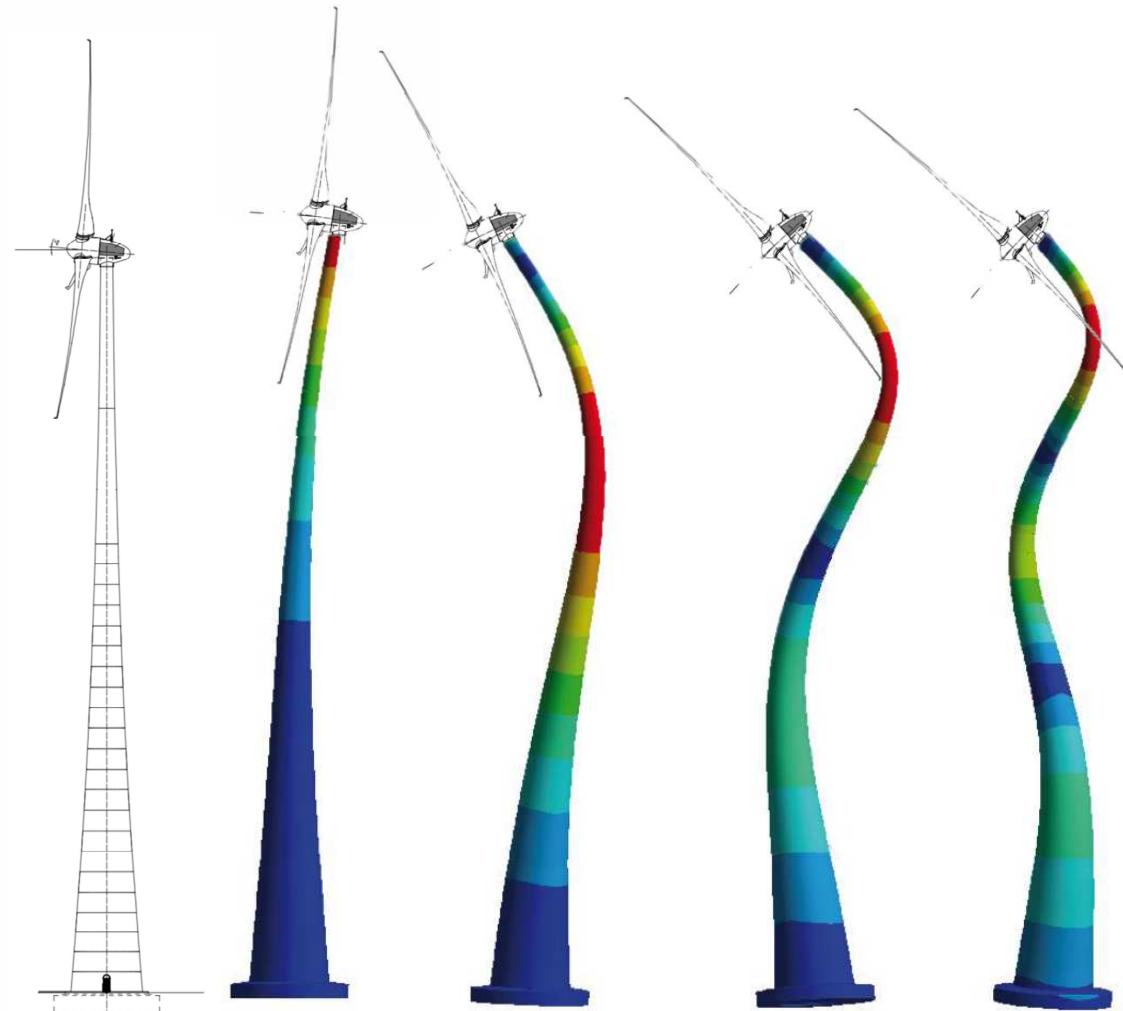


# Inhaltliche Bearbeitung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

## AP 1.1

Ermittlung der Schwingungs-eigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission



## AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

## AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 8



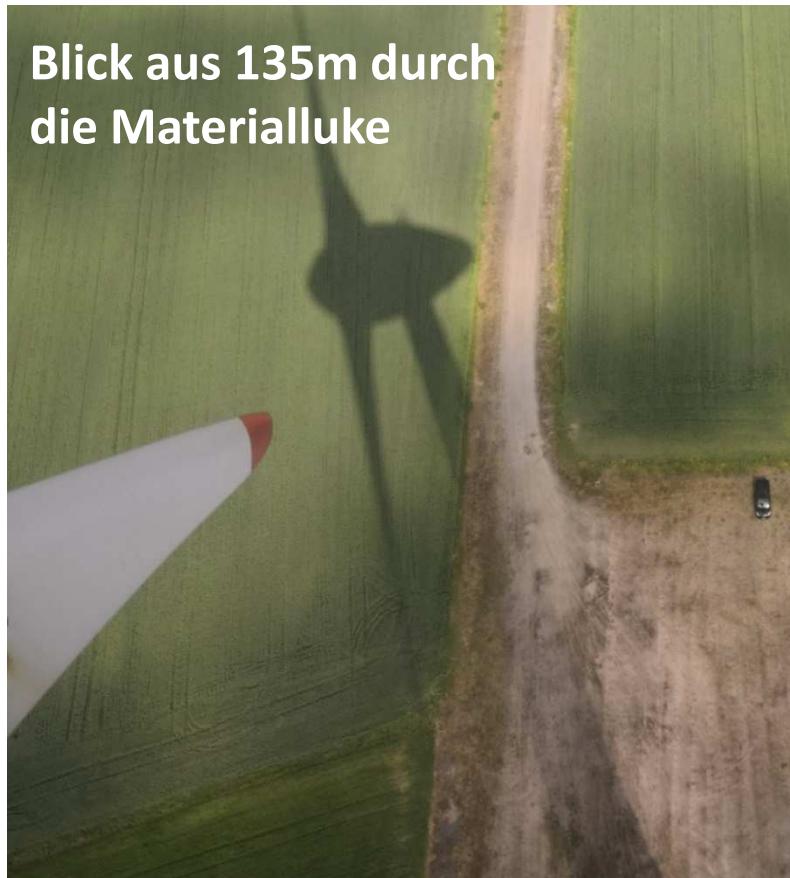
EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



# Vorbereitung der Messungen

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

## Auswahl geeigneter WEA – Start bei Enercon in Aurich



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung



EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



# Vorbereitung der Messungen

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

## Kooperationsbereite Betreiber



Bürgerenergie A31 Hohe Mark  
Projekt GmbH & Co.KG



BMR energy solutions GmbH



SL Naturenergie GmbH



Energiekontor AG



WestfalenWIND GmbH

Windkraft Moorsfeld GmbH & Co.KG



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 10



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



## Turmmessung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

### Turmmessung an einer WEA ohne Getriebe



**Typ:** Enercon E 115

**Baujahr:** 2017

**Leistung:** 3 MW

**Nabenhöhe:** 146,7 m

**Standort:** Heiden

**Betreiber:** Bürgerwindpark A31  
Hohe Mark



## Turmmessung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

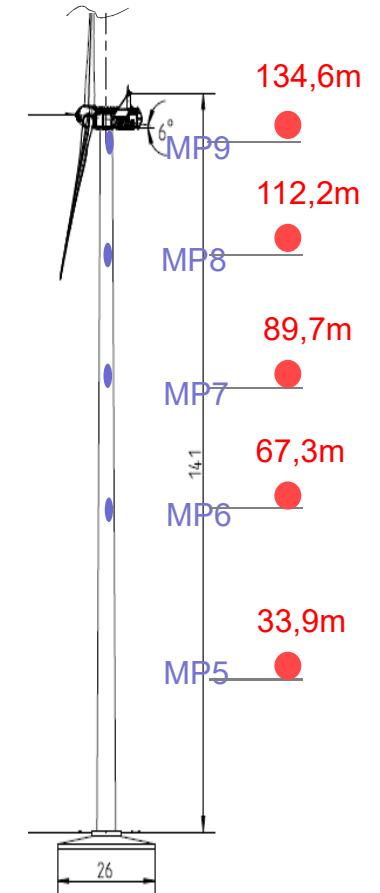
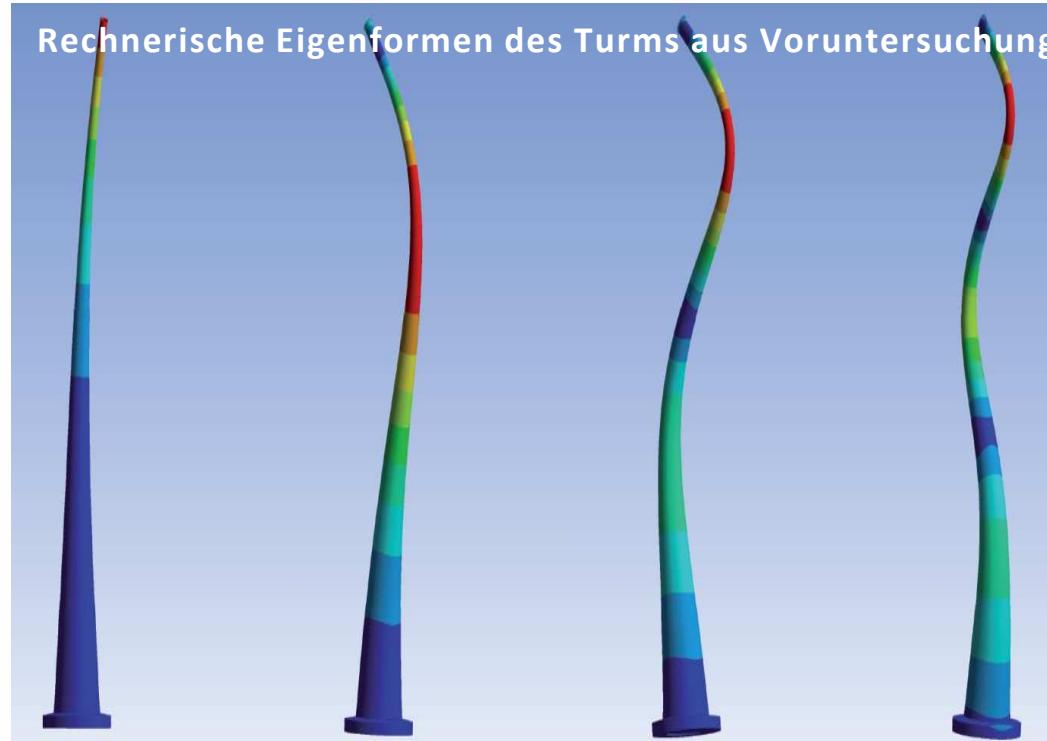
### Turmmessung an einer WEA mit Getriebe



<b>Typ:</b>	Vestas V126
<b>Baujahr:</b>	2017
<b>Leistung:</b>	3,3 MW
<b>Nabenhöhe:</b>	137 m
<b>Standort:</b>	Paderborn Benhausen
<b>Betreiber:</b>	Windkraft Moorsfeld GmbH & Co.KG



## Turmmessungen Sensorpositionen im Turm



Sensorpositionen vom Fundament bis zur Gondel



## Turmmessung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

### Turmmessung – Impressionen aus den Türmen



Betriebszustände während der Messung:

**2h ohne WEA Betrieb**  
**46h unter WEA Betrieb**



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 14



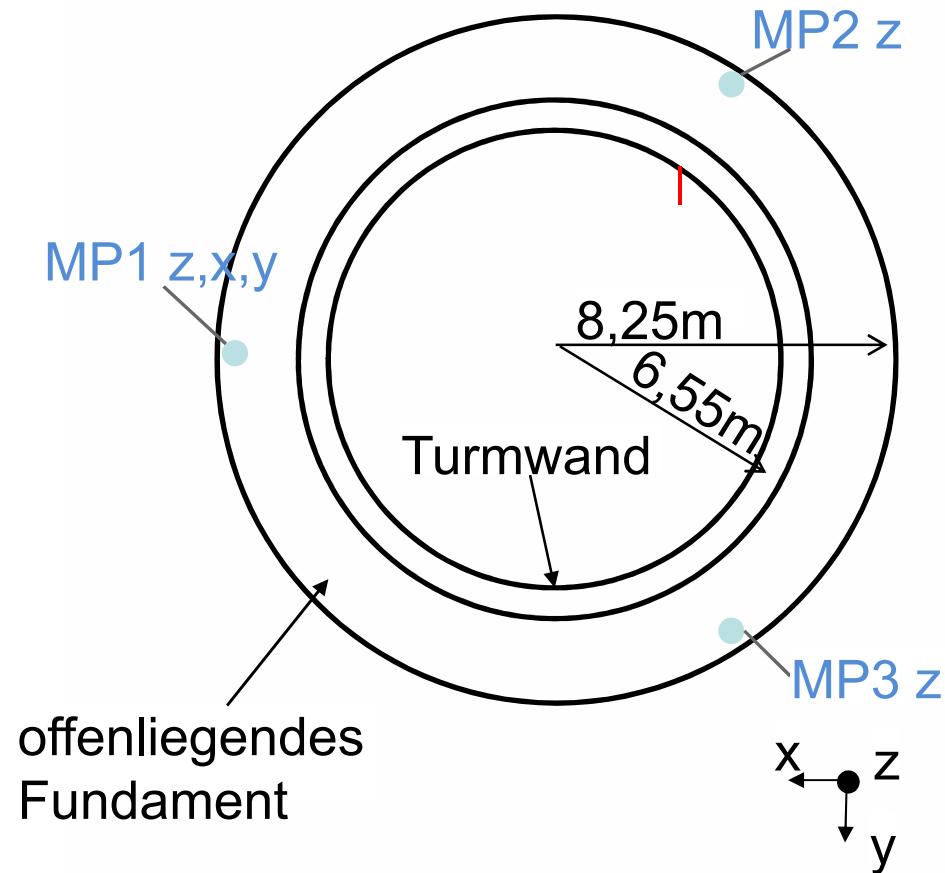
EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung



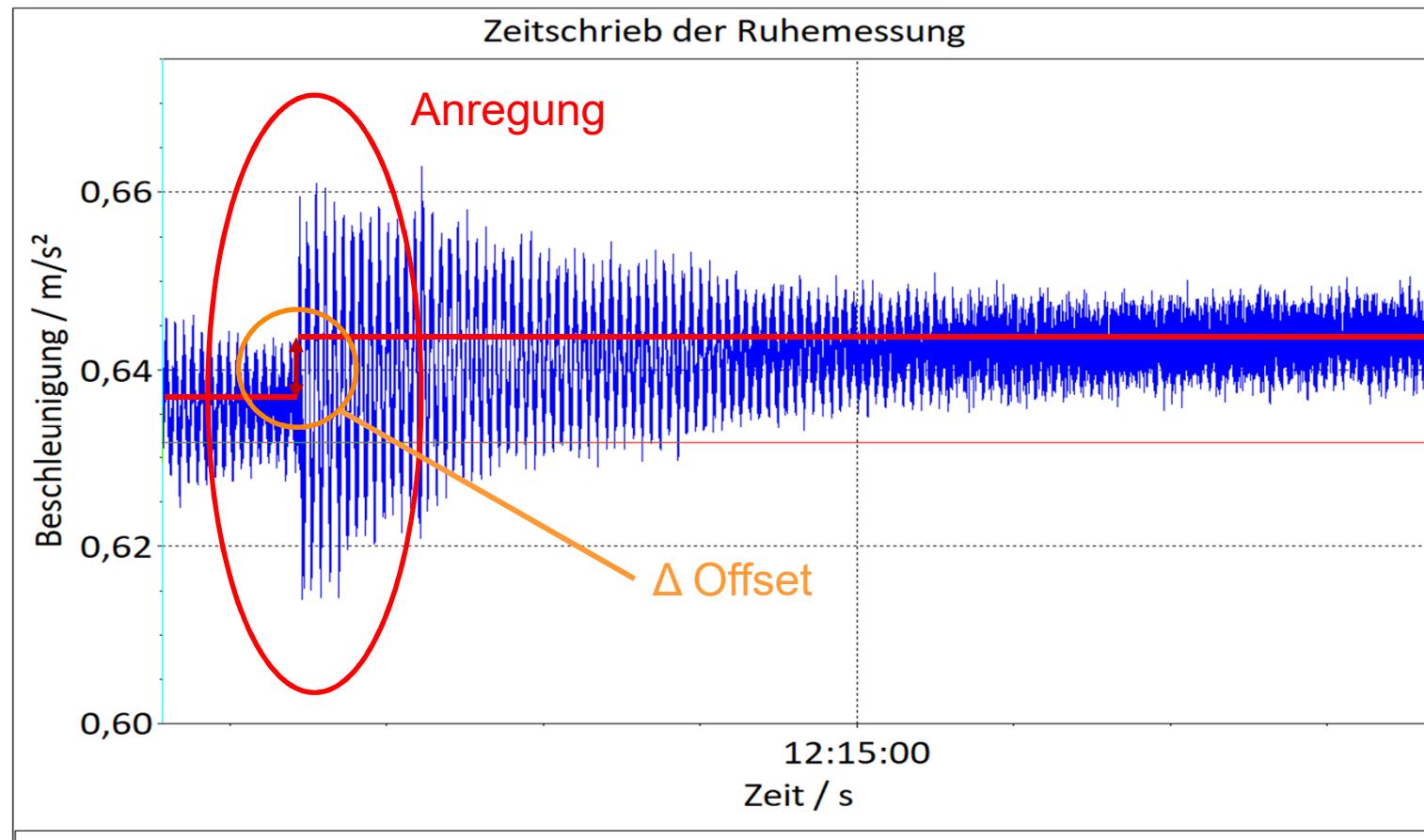
## Turmmessung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

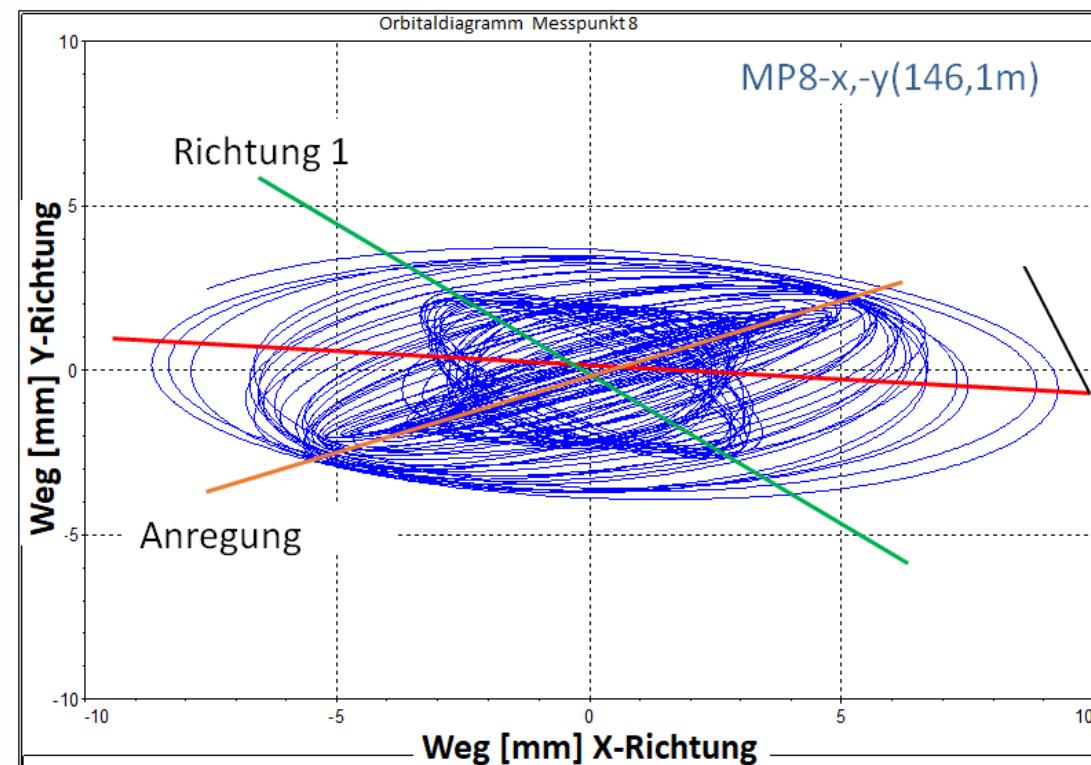
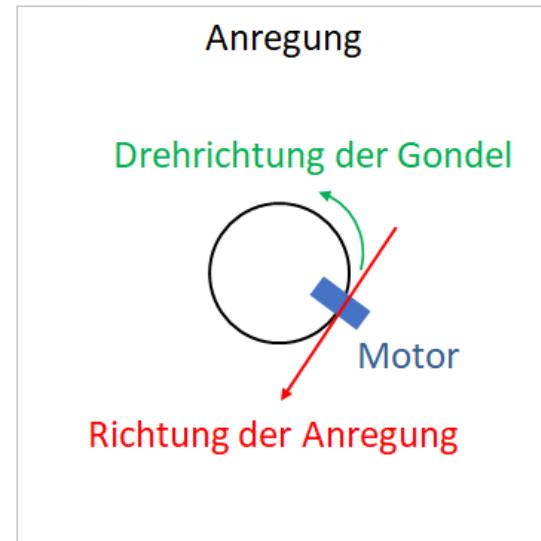
### Turmmessung – Fundamentmesspunkte



## Auswertung im Zeitbereich - Ergebnisse MP unter Gondel



## Erklärung des Anregungsmechanismus





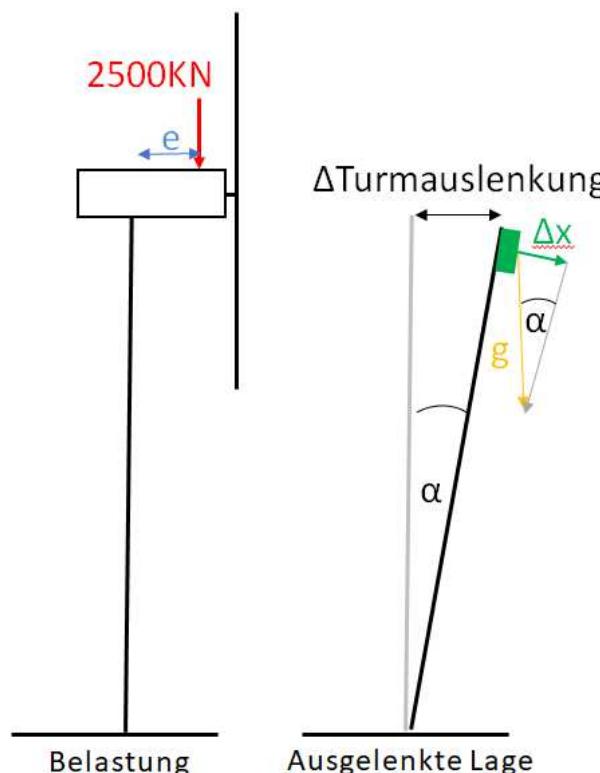
## Turmmessung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

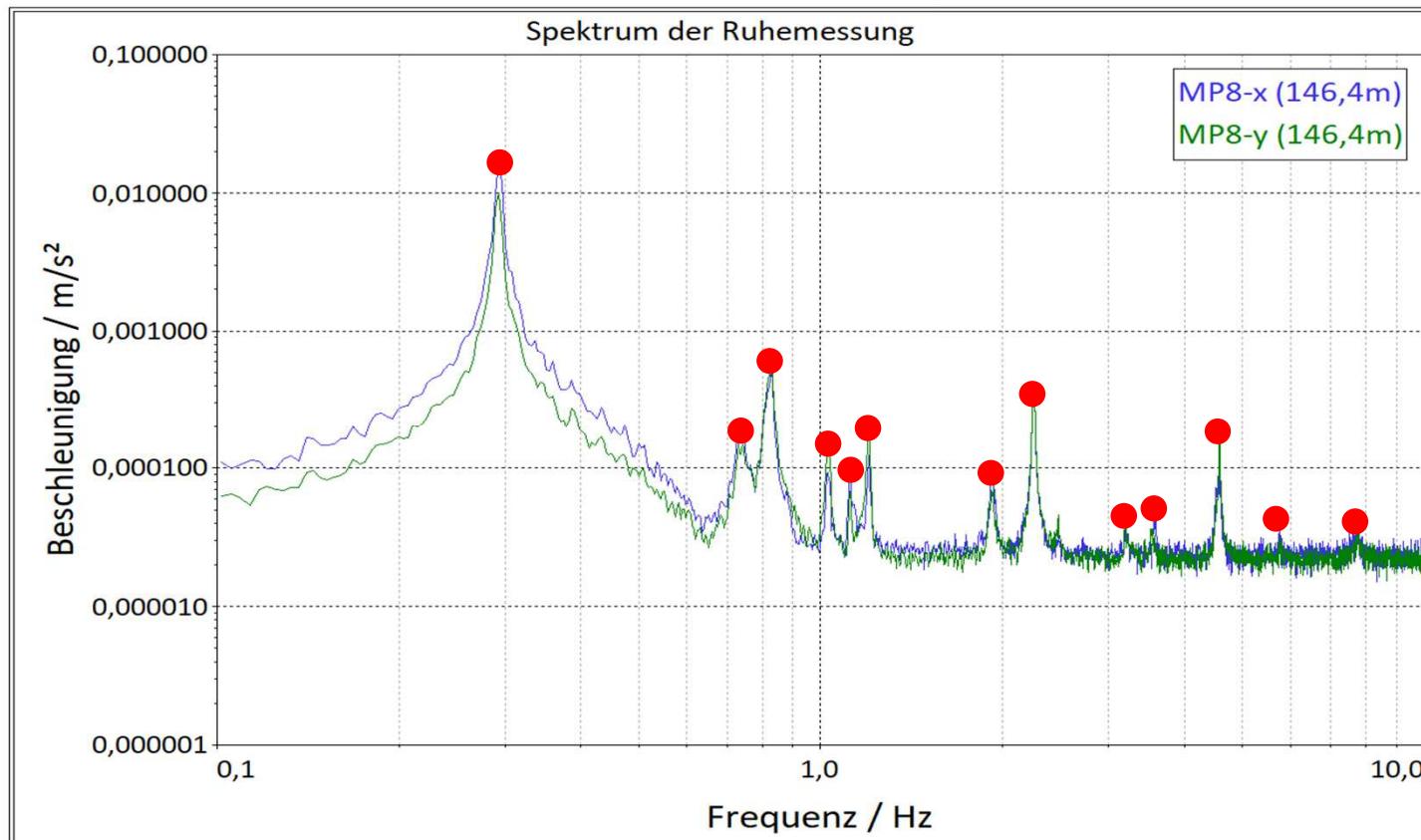
### Erklärung des veränderlichen Offsets



Sensoreinheit an Turmwand

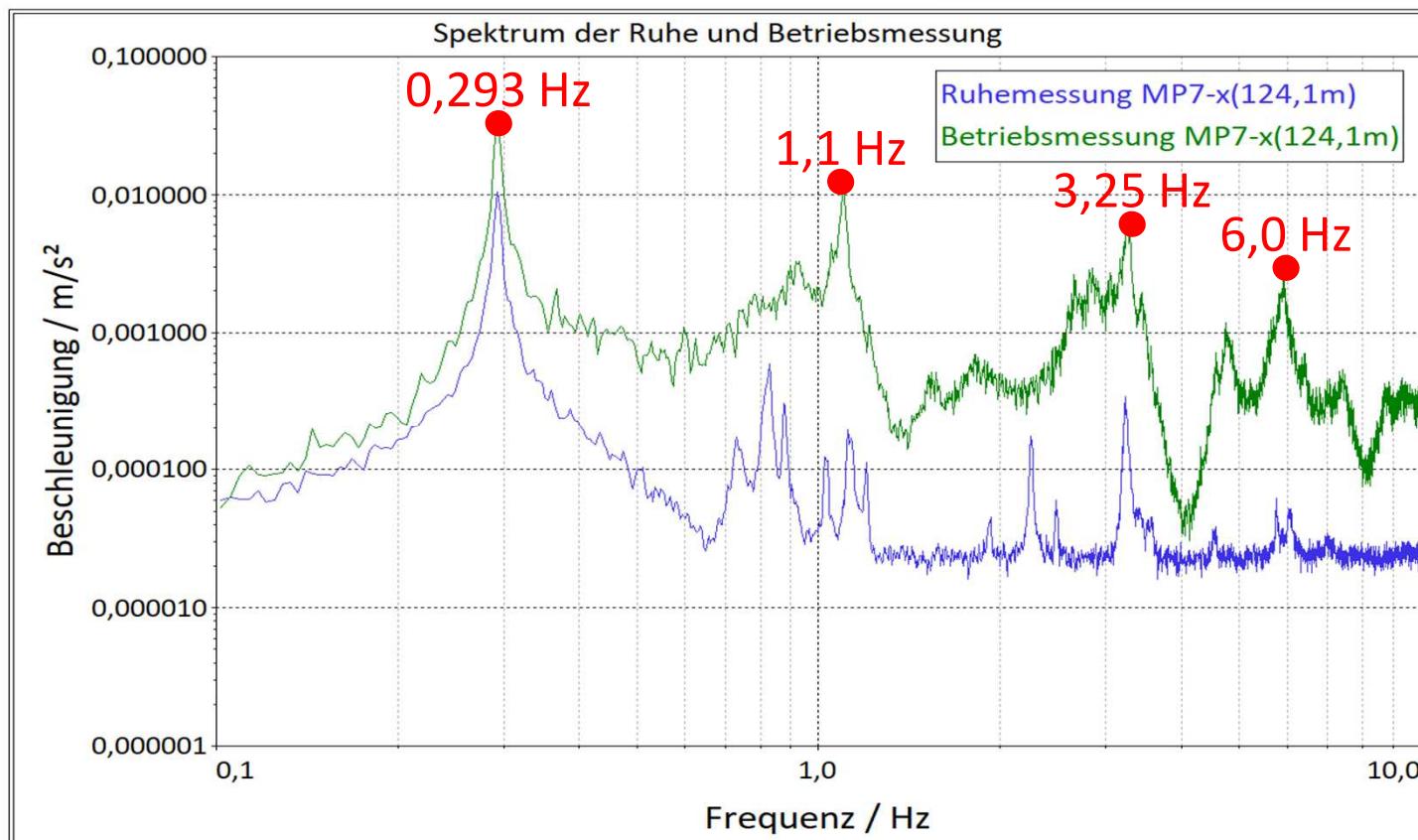


## Auswertung im Frequenzbereich - Ergebnisse MP unter Gondel



- Eigenfrequenzen / Anregungsfrequenzen ?

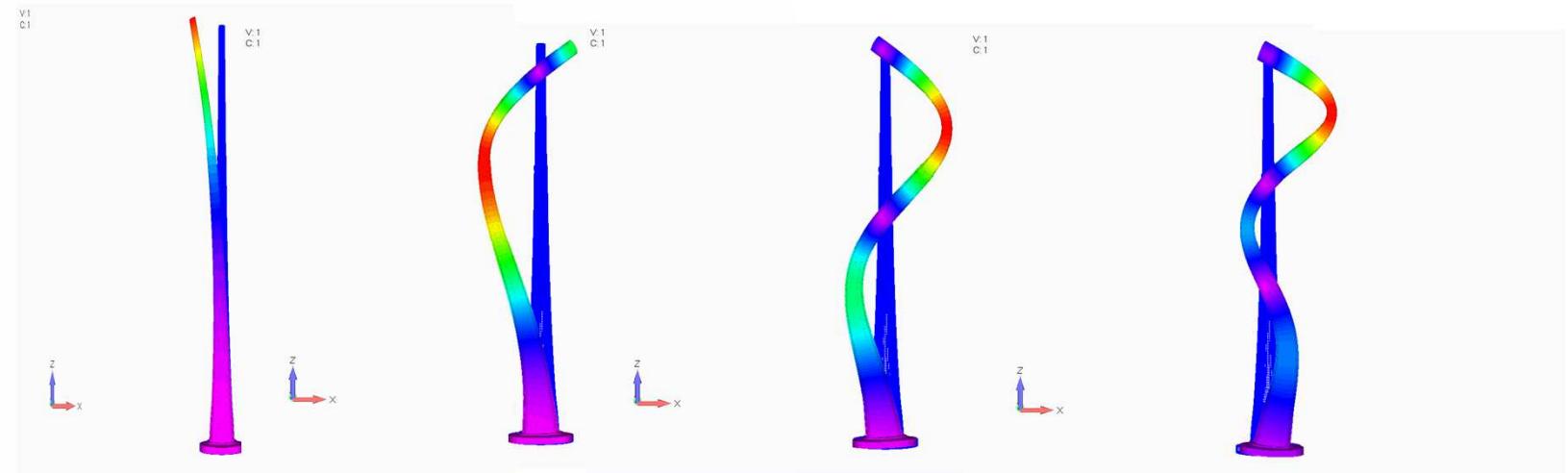
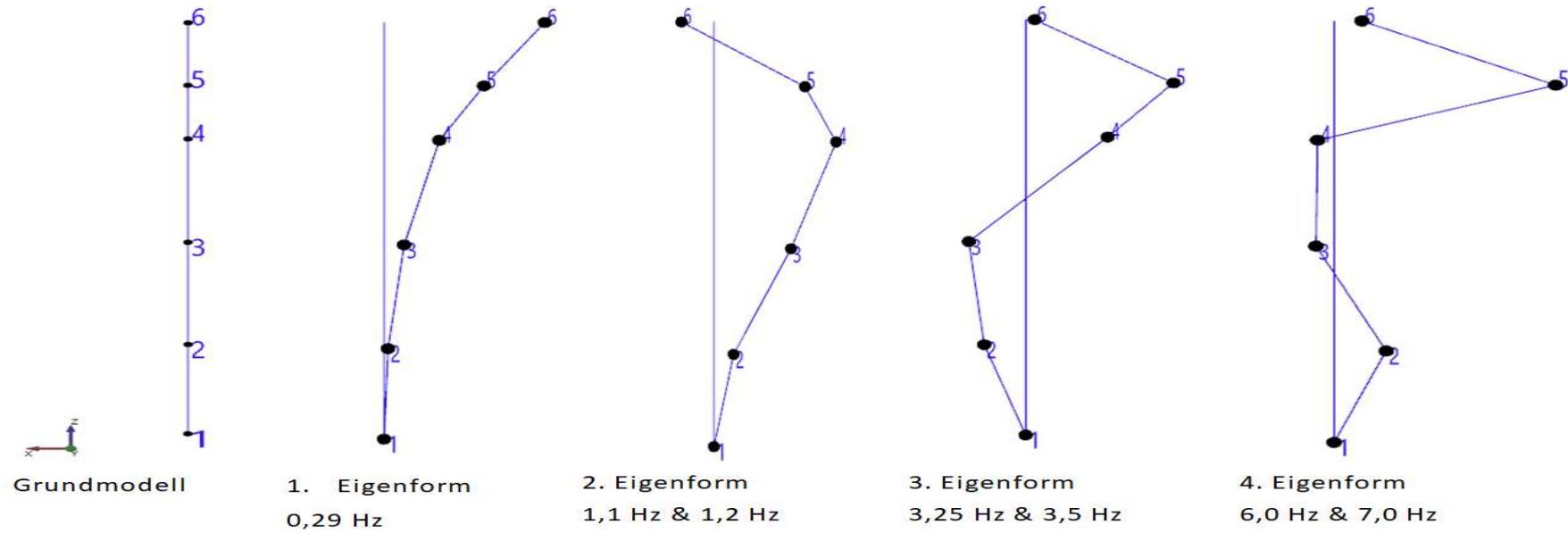
## Auswertung im Frequenzbereich - Ergebnisse MP unter Gondel



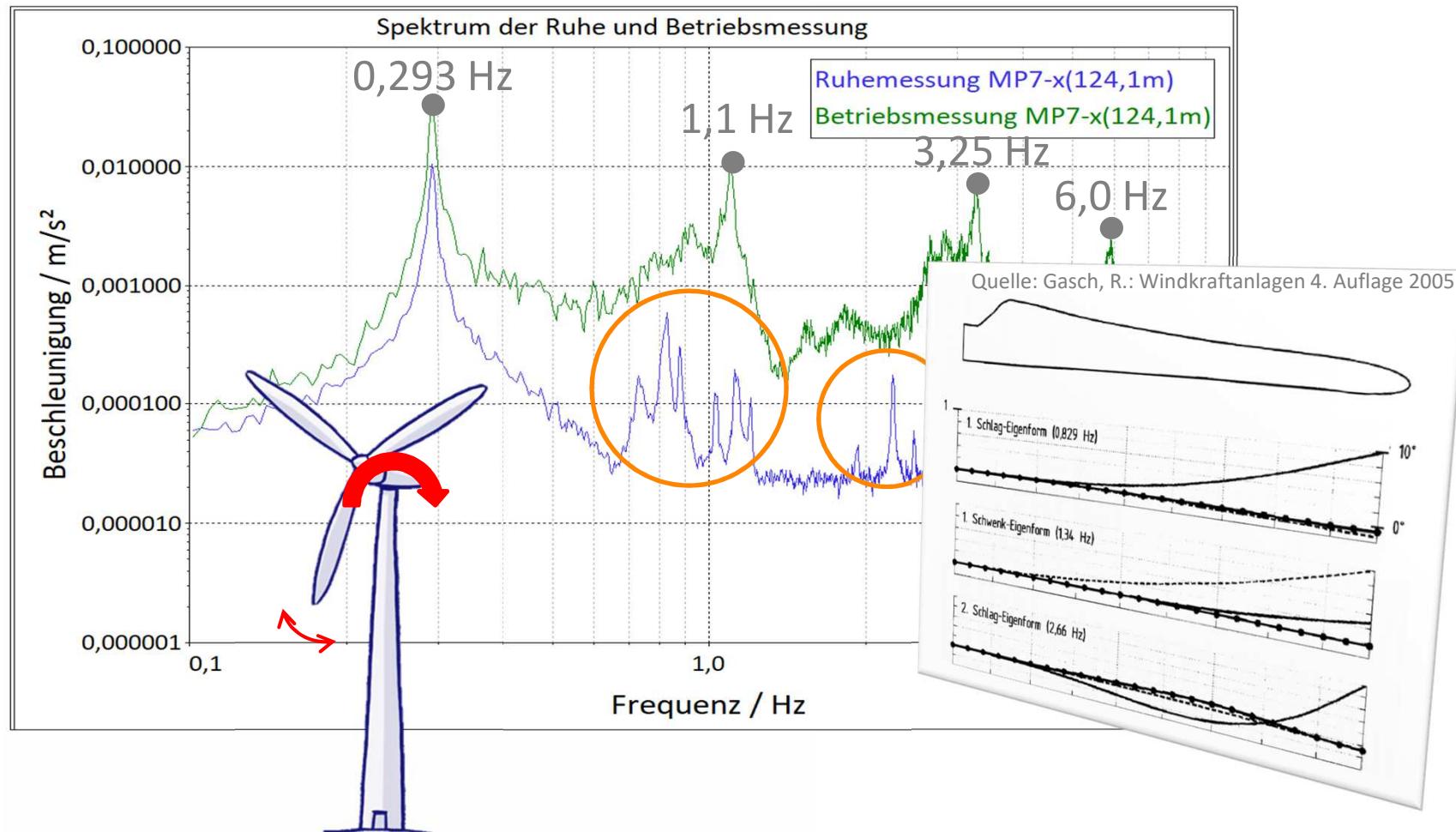


# Turmmessung Modalformen

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MASTLER



## Auswertung im Frequenzbereich - Ergebnisse MP unter Gondel



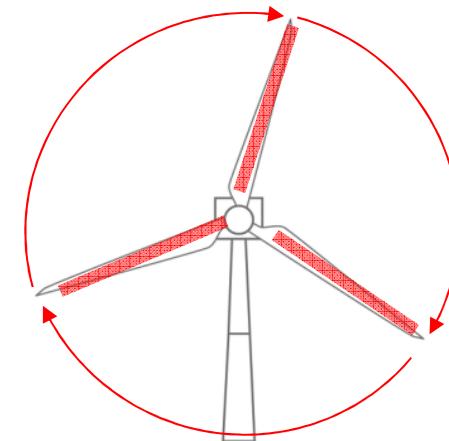
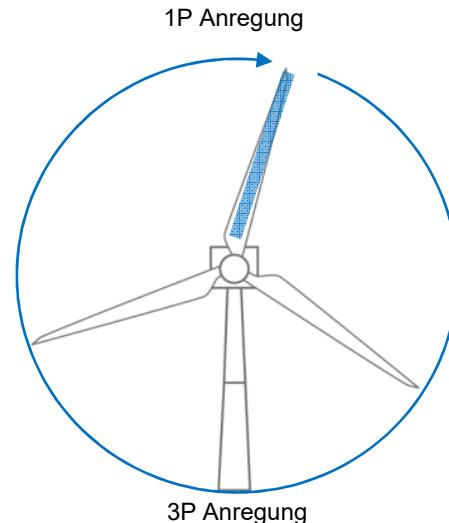
## Exkurs – Anregung aus Rotor-Drehung

### Rotordrehzahl

Bereich:            0 – 15 U/min  
                      0 – 0,25 Hz

### Rotorblatt-Durchgangsfrequenz

Bei 3 Rotorblättern:  $3 \times U$   
Bereich:            0 – 45 1/min  
                      0 – 0,75 Hz

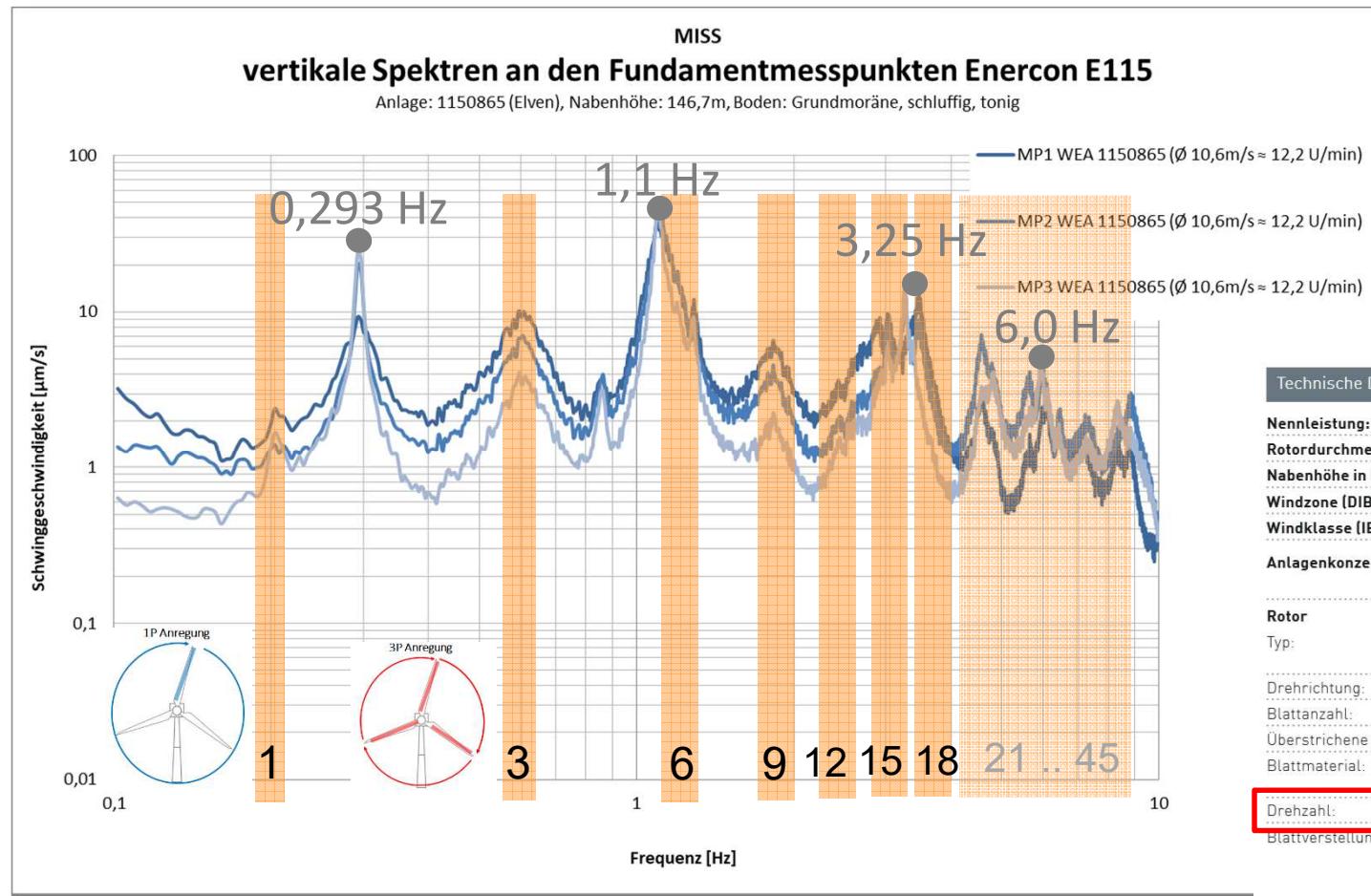




# Turmmessung

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

## Auswertung im Frequenzbereich - Ergebnisse Fundamentmesspunkte



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 24



EUROPAISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung

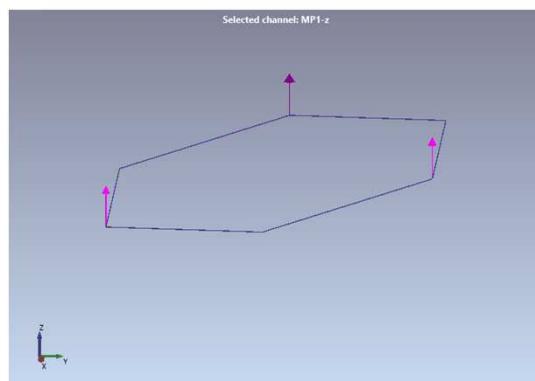


# Turmmessung

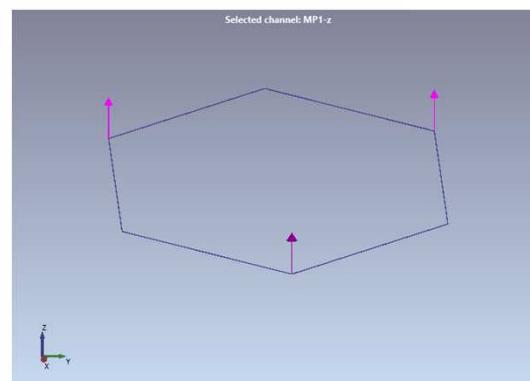
BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

## Turmmessung an einer E115 – Modalformen des Fundamentes

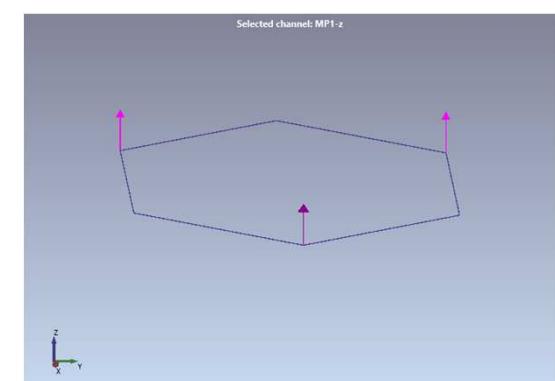
Visualisierung der Fundamentbewegung



0,29 Hz (Mode 1)



0,58 Hz (3P)



1,1 / 1,2 Hz (Mode 2)



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

MISS – Teilprojekt BHM - Folie 25



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung

**AP 1.1**

Ermittlung der Schwingungs-eigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

**AP 1.2**

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß



**AP 3.1**

Minderung der Störwirkung an der Quelle

# Erkenntnisse





## Erkenntnisse AP 1.1

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

### Fundamentmessungen an E115-Anlagen auf unterschiedlichen Baugründen



Mit Unterstützung von:



EFRE.NRW  
Investitionen in Wachstum  
und Beschäftigung

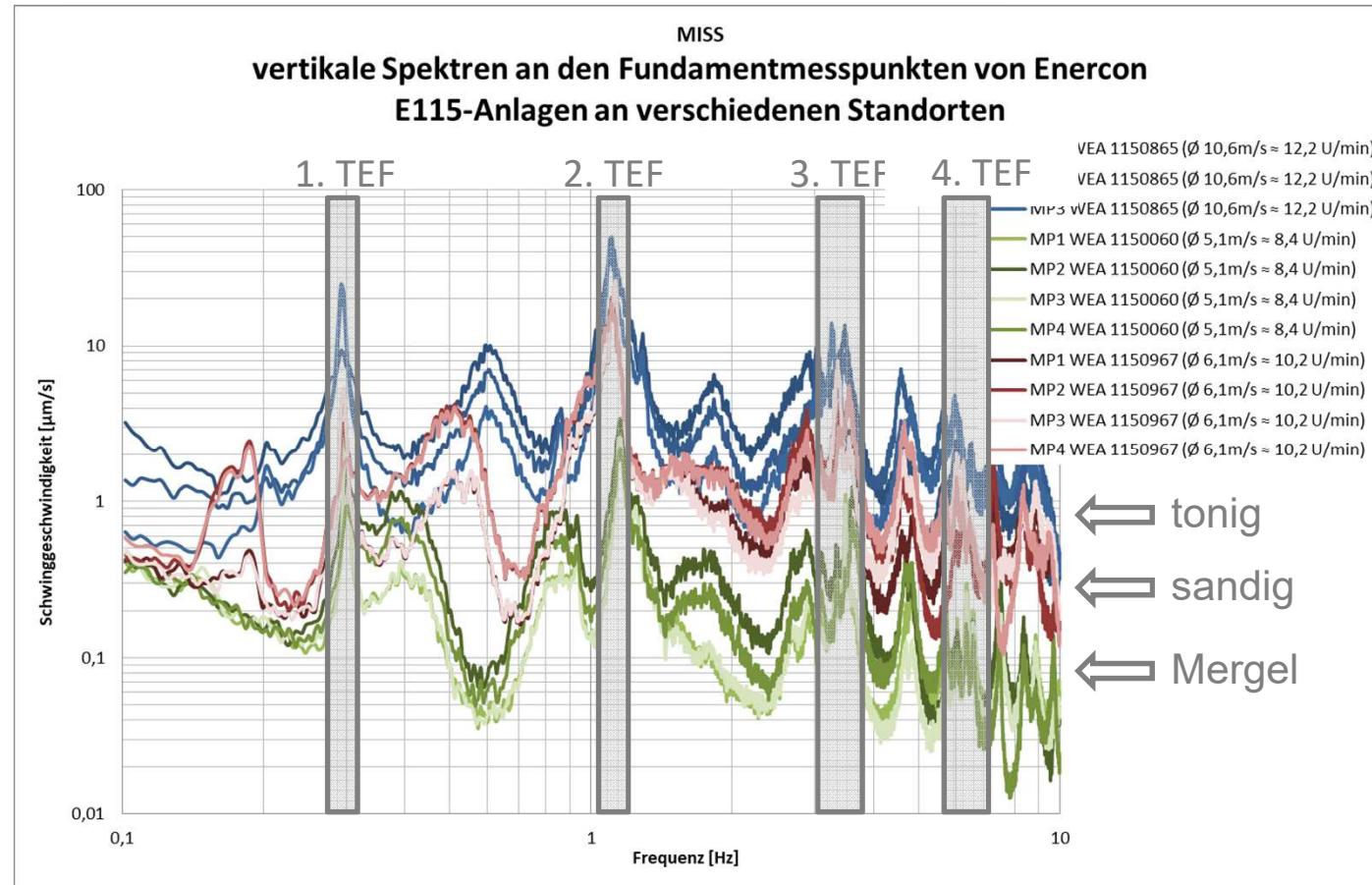
MISS – Teilprojekt BHM - Folie 27



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung

## Fundamentmessung an verschiedenen E115

Vergleich verschiedener Standorte





## Erkenntnisse AP 1.1

BAUDYNAMIK  
HEILAND & MISTLER  
GmbH

### Turmmessung an einer WEA ohne und einer mit Getriebe

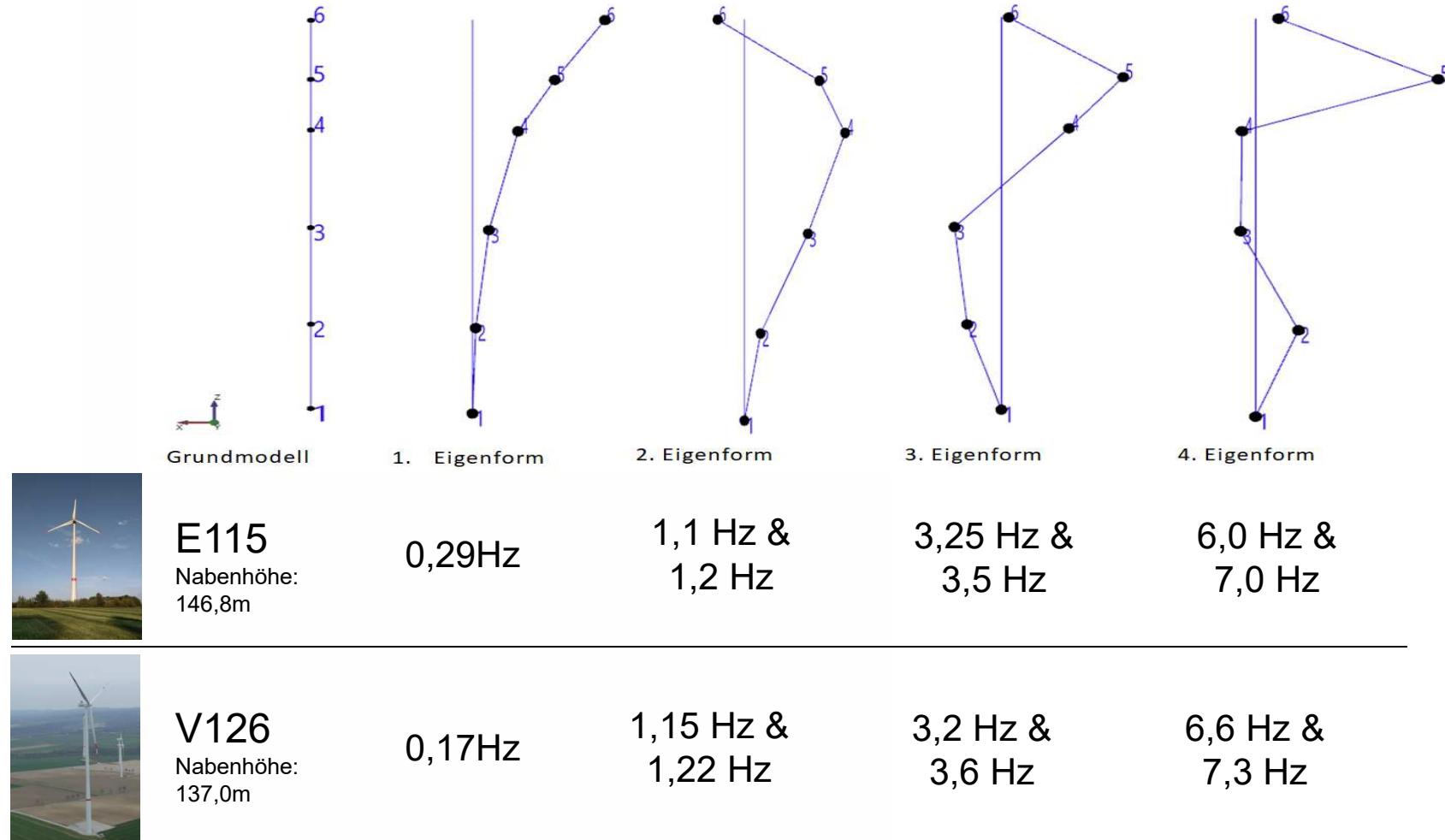


**Typ:** Enercon E 115



**Typ:** Vestas V126

## Messtechnisch ermittelte Modalformen einer Anlage mit und ohne Getriebe



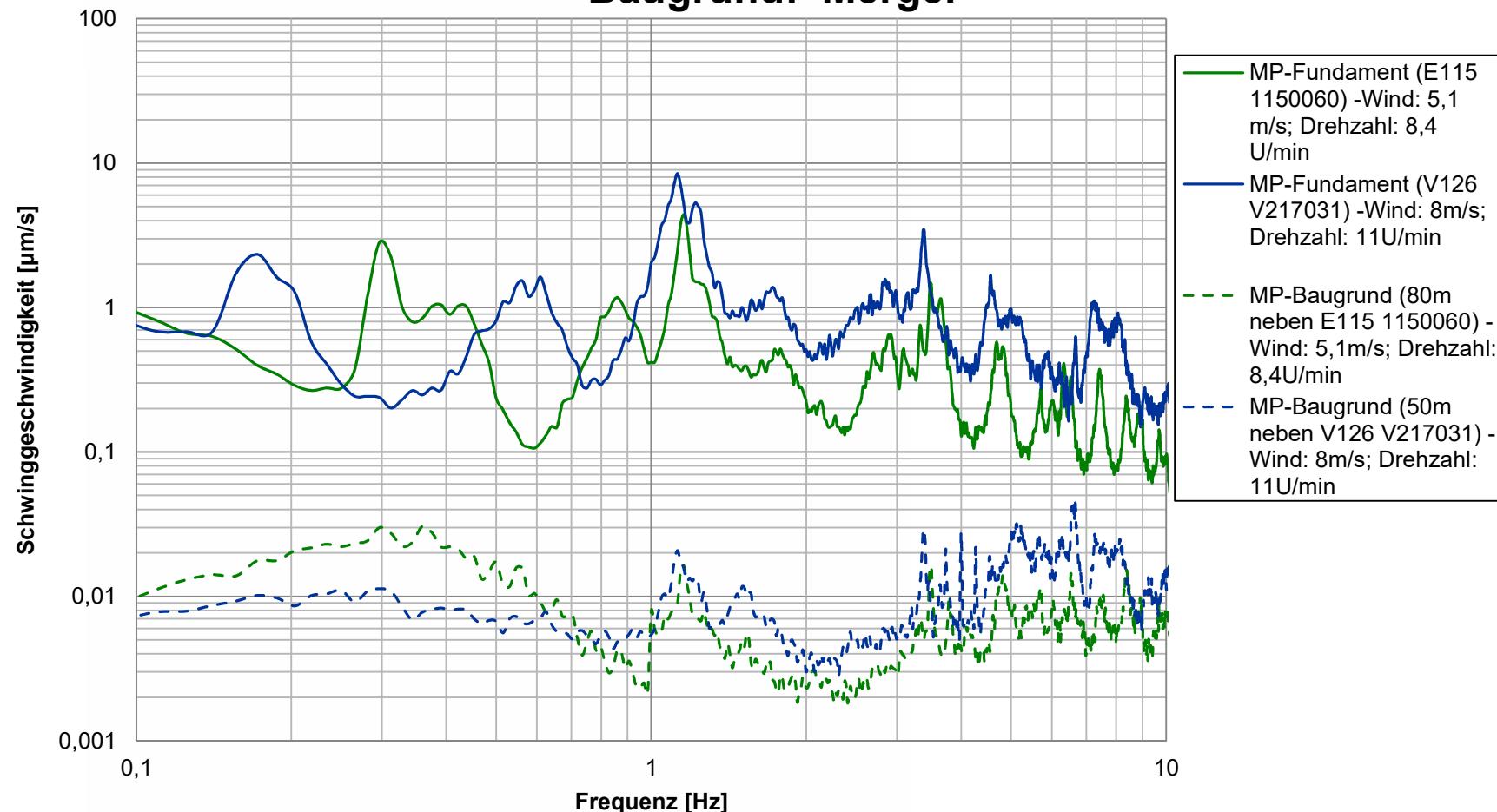


### Fundamentmessungen an Anlagen mit und ohne Getriebe



MISS

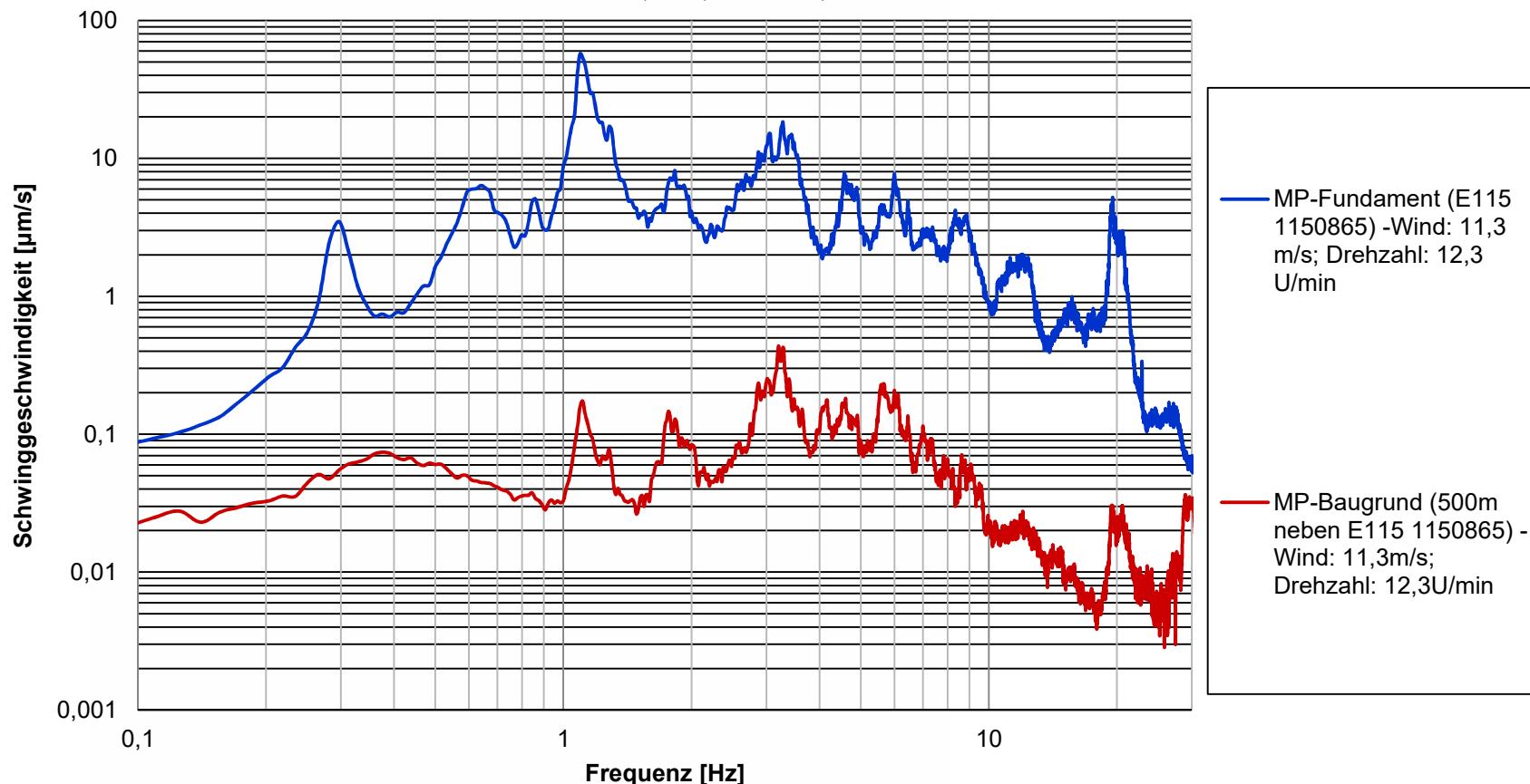
## Vergleich Fundament- und Baugrundmesspunkt E115 / V126 Baugrund: Mergel



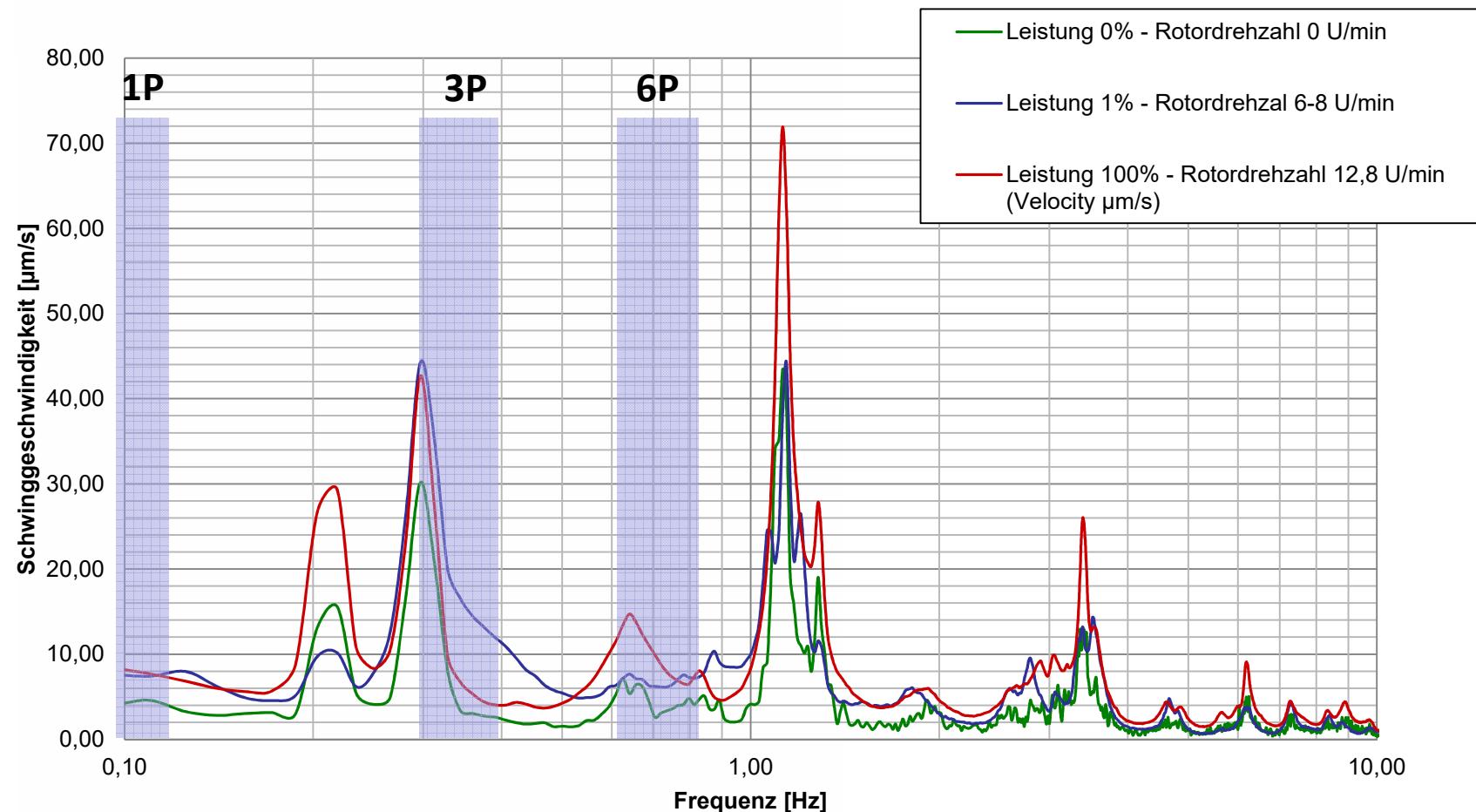
## Vergleich Fundament E115 und Baugrundmesspunkt 125-500m

### Enercon E115 (1150865)

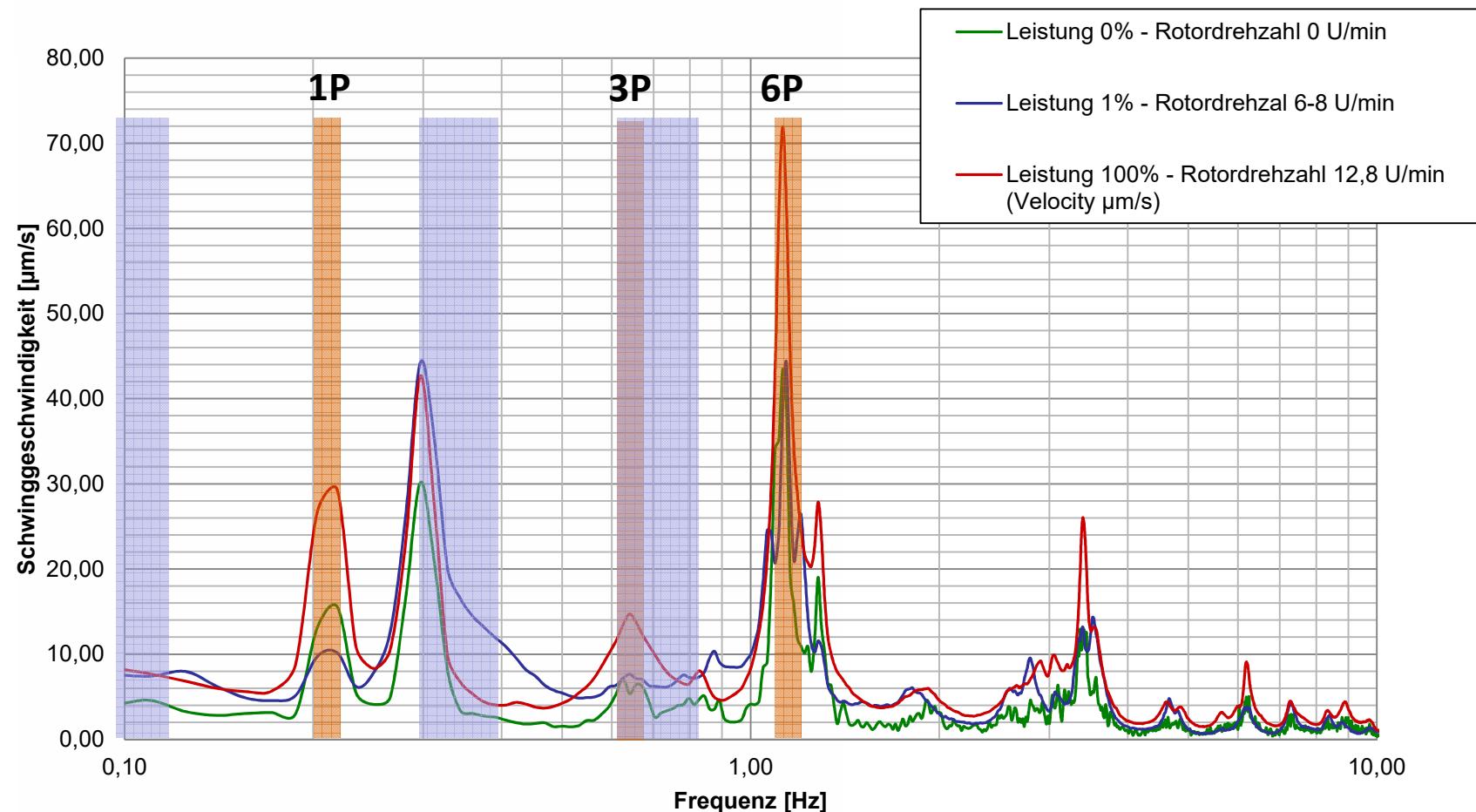
Abstand Baugrundmesspunkt ca. 125m, 250m, 500m Messung am 19.09.2018, Baugrund: schluffig/tonig, Wind: 11,3m/s, Rotor≈ 12,3 U/min

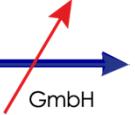


## Einfluss der Rotordrehzahl auf den Fundamentschwingungspegel (Wind 10-15m/s)

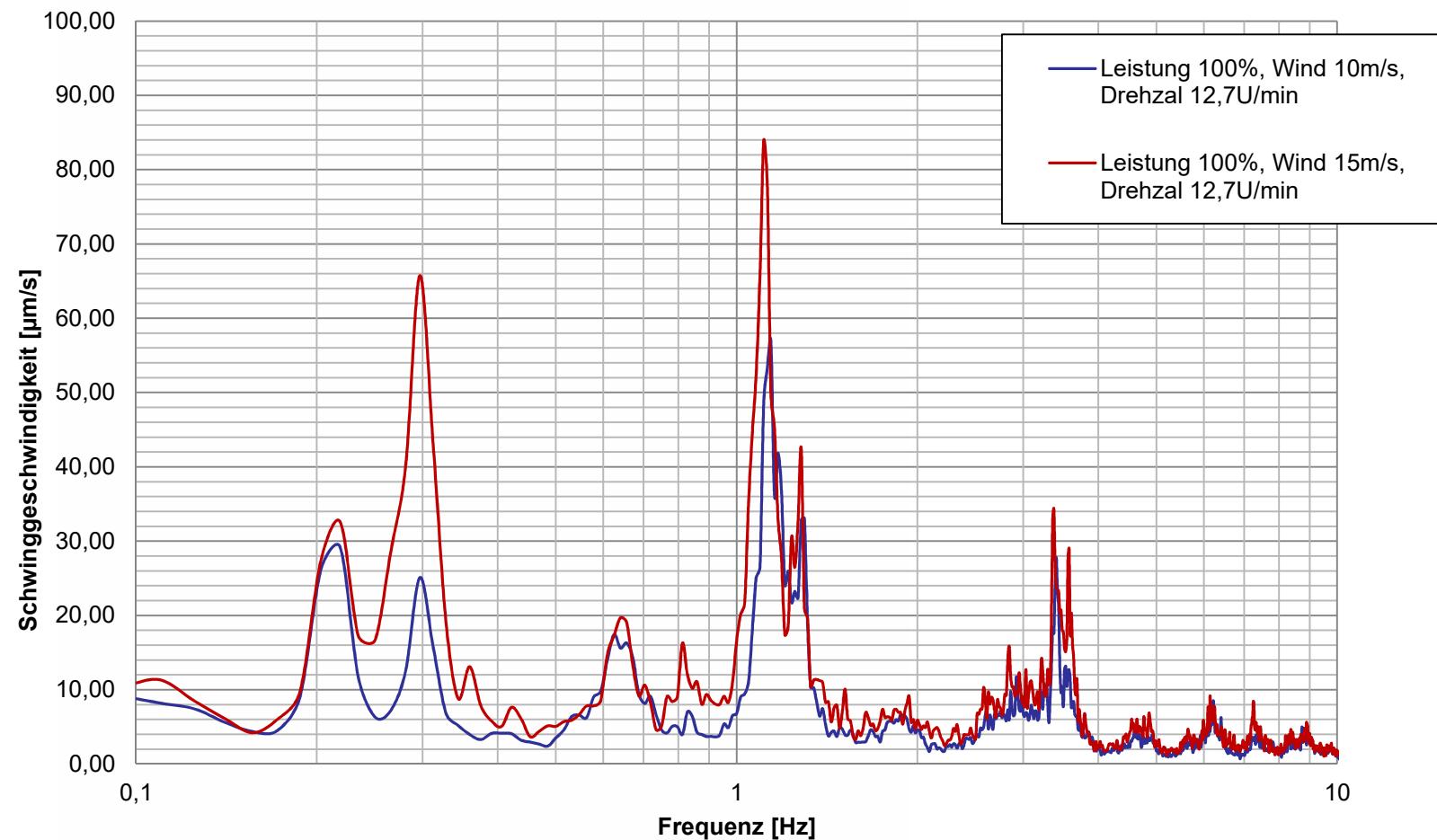


## Einfluss der Rotordrehzahl auf den Fundamentschwingungspegel (Wind 10-15m/s)





## Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Fundamentschwingungspegel





### Zusammenfassung:

- In den Typenstatiken für WEAs werden Anforderungen an die Drehfedersteifigkeit gestellt, die je nach Baugrund unterschiedliche Fundamentierungen erfordert. Durch diese Vorgabe sind die Eigenfrequenzen der Anlagen baugrundunabhängig nahezu gleich.
- Die Eigenfrequenzen der beiden untersuchten Anlagen (E115 und V126) sind trotz unterschiedlicher Turmbauart und Gondelmassen bis auf die 1. Eigenfrequenz nahezu gleich.
- Durch aerodynamische Anregung und die Rotorblatt-Durchgangsfrequenzen (vielfache der 3P Anregung) kommt es zu Resonanzanregungen der höheren Turmeigenfrequenzen.
- Die erste Eigenfrequenz des Turmes wird aufgrund der aerodynamische Dämpfung des drehenden Rotors stark bedämpft. Auf dem Baugrund neben der WEA tritt diese Frequenz nicht mehr (maßgeblich) auf.



### Zusammenfassung:

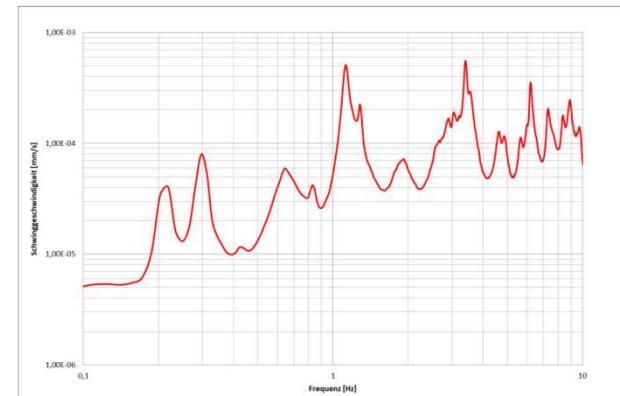
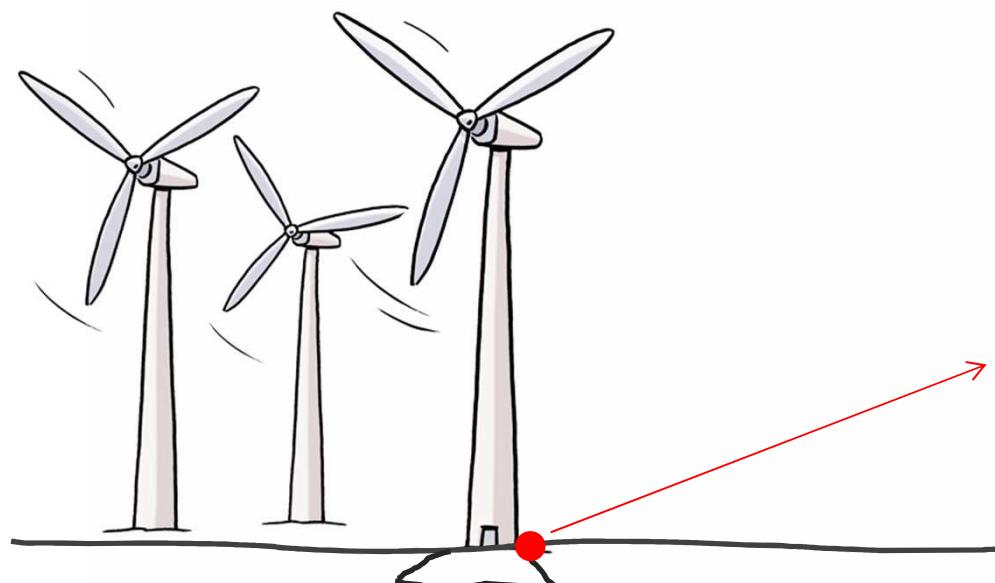
- Die Anregungskräfte sind abhängig von der Windgeschwindigkeit und Rotordrehzahl.
- Über das Fundament erfolgt die Übertragung der Emissionen aus dem Betrieb der WEA auf den Baugrund.
- Die Übertragung auf den Baugrund erfolgt durch Fundament-Kippbewegung maßgeblich im Frequenzbereich  $f>1\text{Hz}$ .
- Durch die Fundamentbewegung wird der Boden angeregt. Die Wellenausbreitung ist bodenabhängig (Thema DMT)

### AP 1.2

Entwicklung eines Prognosemodells parallel zu weiteren Fundamentmessungen

#### Ziel:

Angabe eines Emissionsspektrum im maßgebenden Frequenzbereich mit ausreichender Genauigkeit, so dass es als Eingangsgröße für die weiteren Berechnungen angesetzt werden kann.





### AP 3.1

Minderungsmaßnahmen der Emissionen an der Quelle (WEA)

#### Möglichkeiten

- Optimierung der Fundamentierung
- Optimierung der Turmstruktur
- Einsatz von Tilgern für die höheren Eigenmoden
- .....

