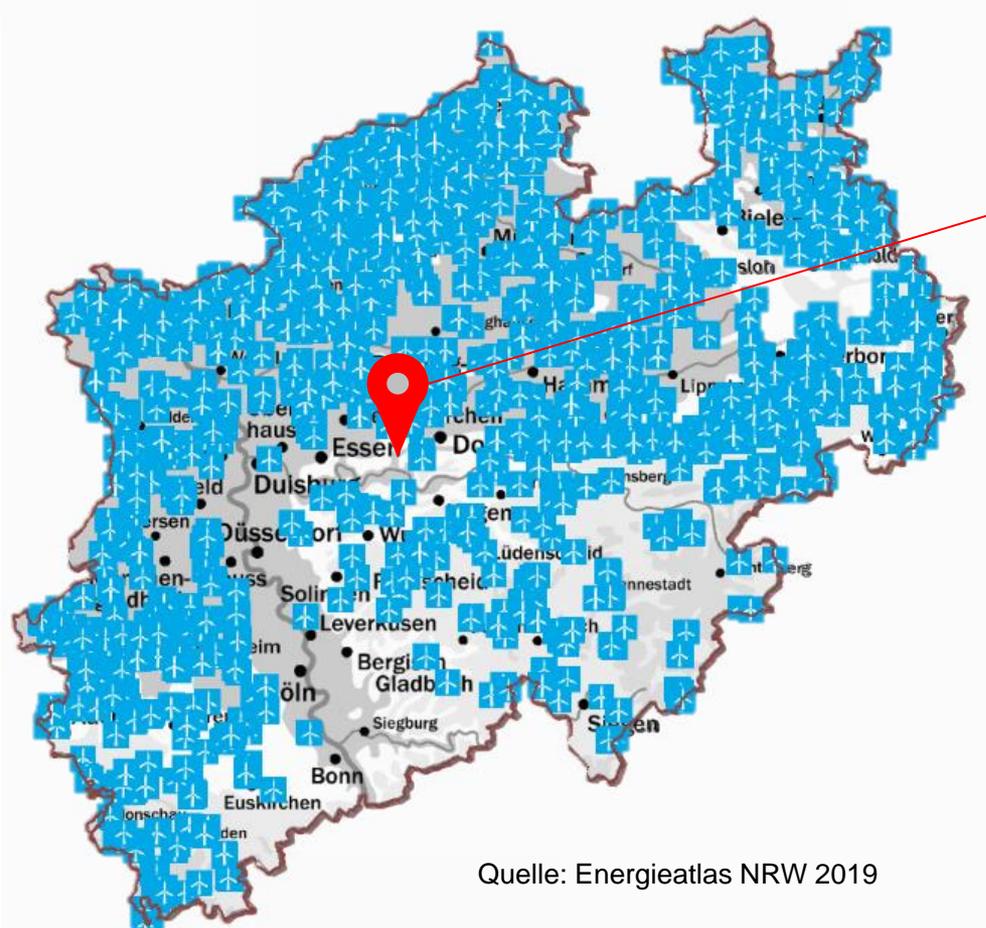


Die Windenergieanlage als Störquelle seismologischer Stationen

Dynamische Eigenschaften und Einwirkungen einer WEA

MISS-Abschlusskonferenz
20.05.2021

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



Quelle: Energieatlas NRW 2019

BAUDYNAMIK
HEILAND & MISTLER GmbH

Bergstraße 174
44807 Bochum
www.baudynamik.de



Industrie



Menschen



Schwingungsempfindliche
Geräte

Schwingungen & Erschütterungen



Baustelle



Verkehr



Messtechnische
dynamische
Untersuchungen

Schwingungsmessungen

Monitoring

Bemessung

Gebrauchstauglichkeit

Berechnung

Prognose

dyn. Systemerregung

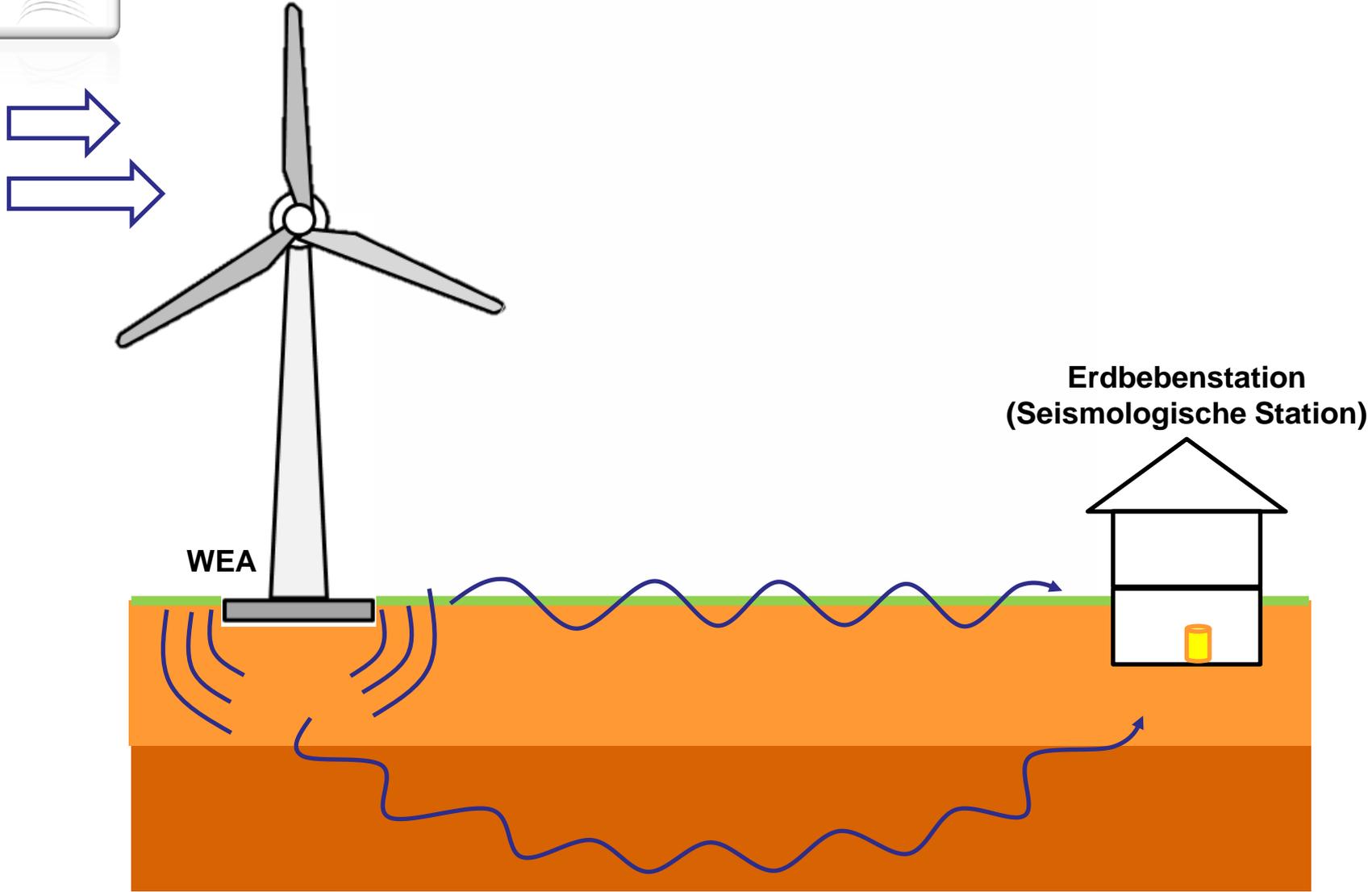


Windenergieanlagen (WEA) emittieren kleinste tieffrequente Schwingungen in den Untergrund, die sich bis zu mehrere Kilometer ausbreiten können. Diese Schwingungen können zwar nicht von Menschen wahrgenommen werden, jedoch erfassen hochsensible Erdbebenmessstationen (EMS) diese Erschütterungen und können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

© nukanute / photocase.de





AP 1.1

Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß



AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle

Ursache

Prognose

Minderung





AP 1.1

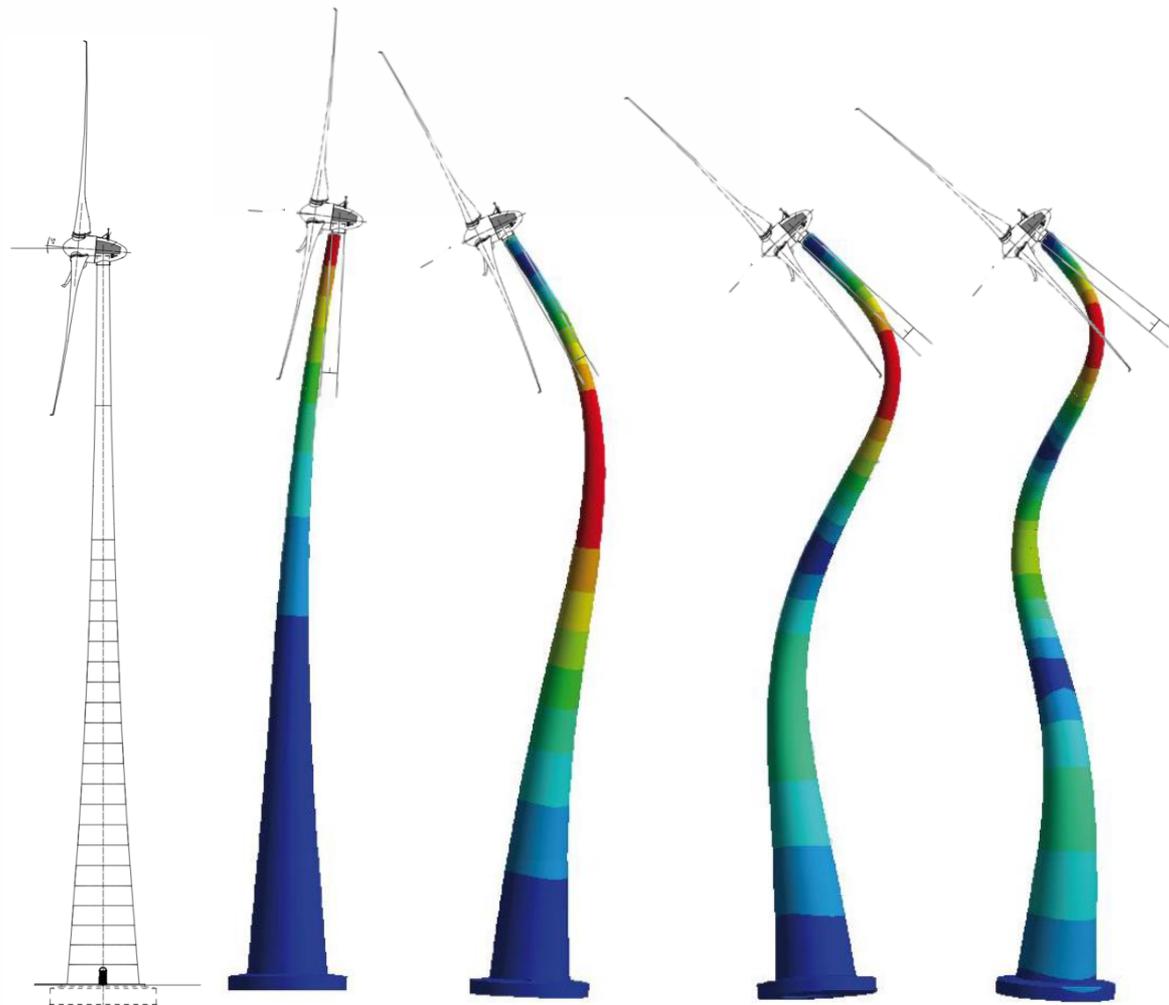
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

AP 1.2

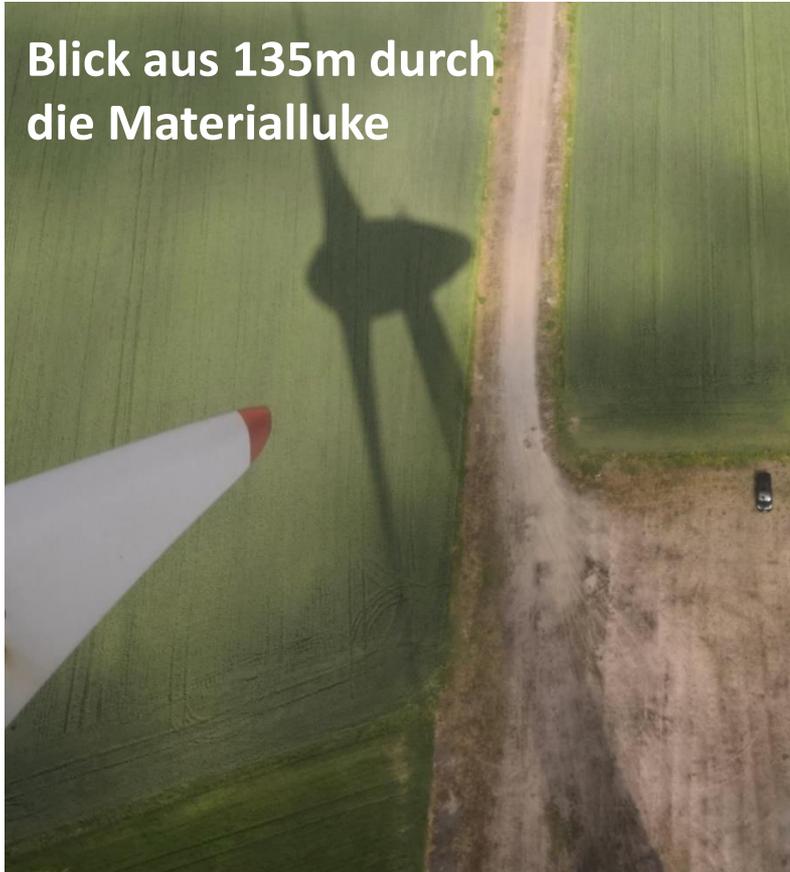
Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle



Auswahl geeigneter WEA – Start bei Enercon in Aurich





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

Turmmessung an einer WEA ohne Getriebe



Typ: Enercon E 115

Baujahr: 2017

Leistung: 3 MW

Nabenhöhe: 146,7 m

Bauart Turm: Hybridturm

Gondelmasse: ca. 270t

Standort: Heiden

Betreiber:



Turmmessung an einer WEA mit Getriebe



Typ:	Vestas V126
Baujahr:	2017
Leistung:	3,3 MW
Nabenhöhe:	137 m
Bauart Turm:	Stahlturm
Gondelmasse:	ca. 195t
Standort:	Paderborn Benhausen
Betreiber:	Windkraft Moorsfeld GmbH & Co.KG

Fundamentmessungen an weiteren Anlagen



6 Stk. E115 (3MW)

2 Stk. E101 (3MW)

2 Stk. V126 (3,3MW)



1 Stk. GE15sl (1,5MW)

1 Stk. SEN 114 (3,2MW)

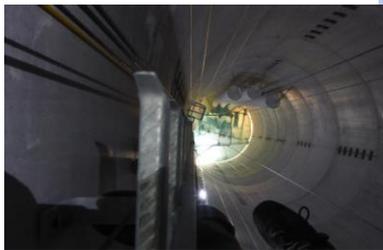
1 Stk. SEN 115 (3,2MW)



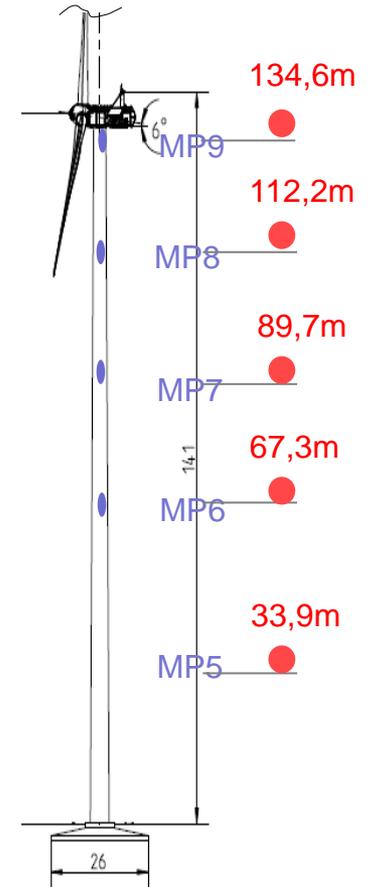
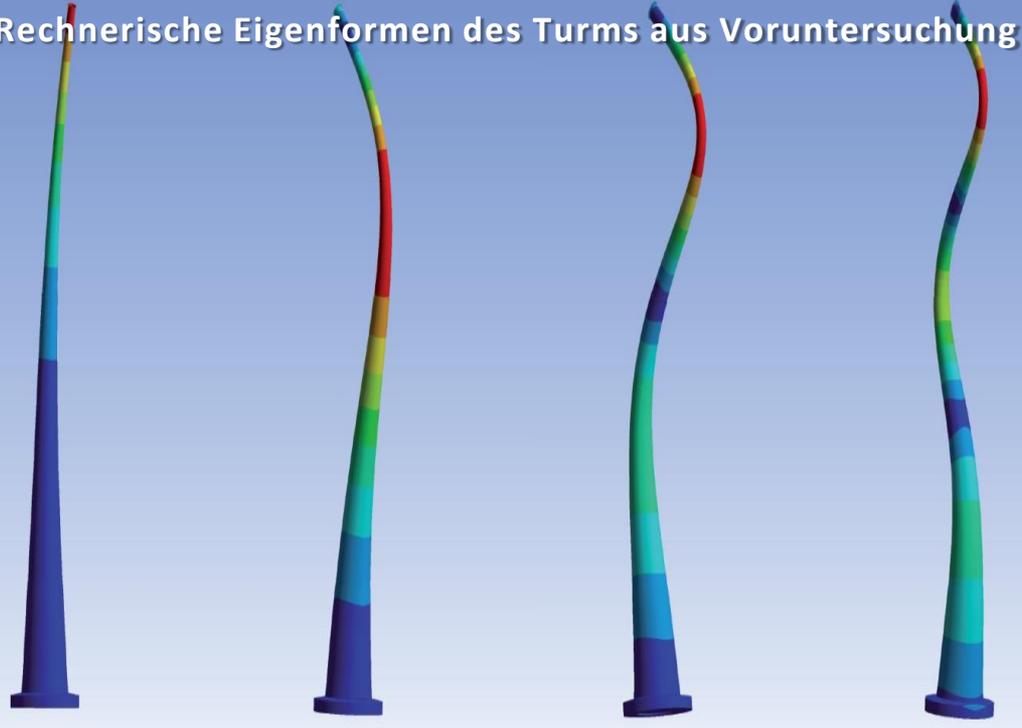
Mit Unterstützung von



Turmmessungen Sensorpositionen im Turm

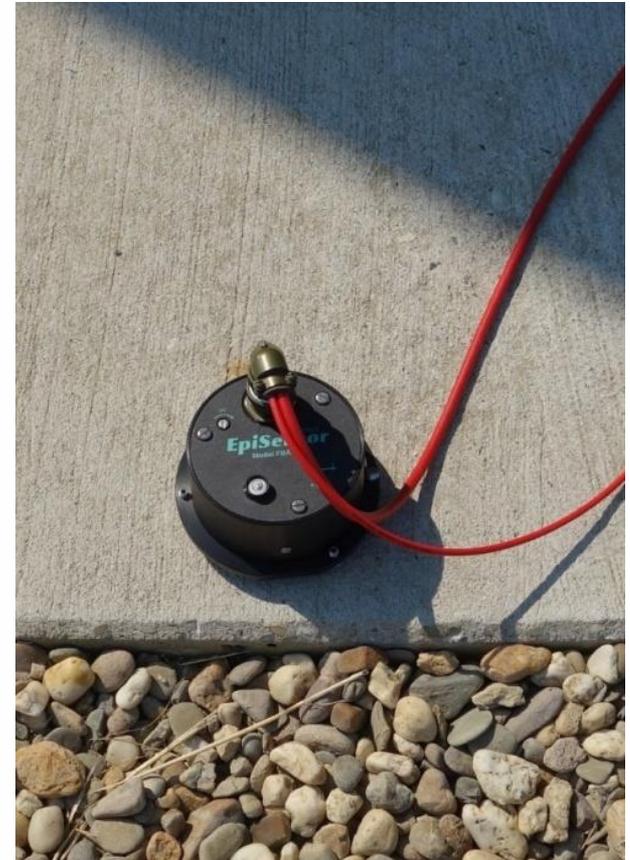
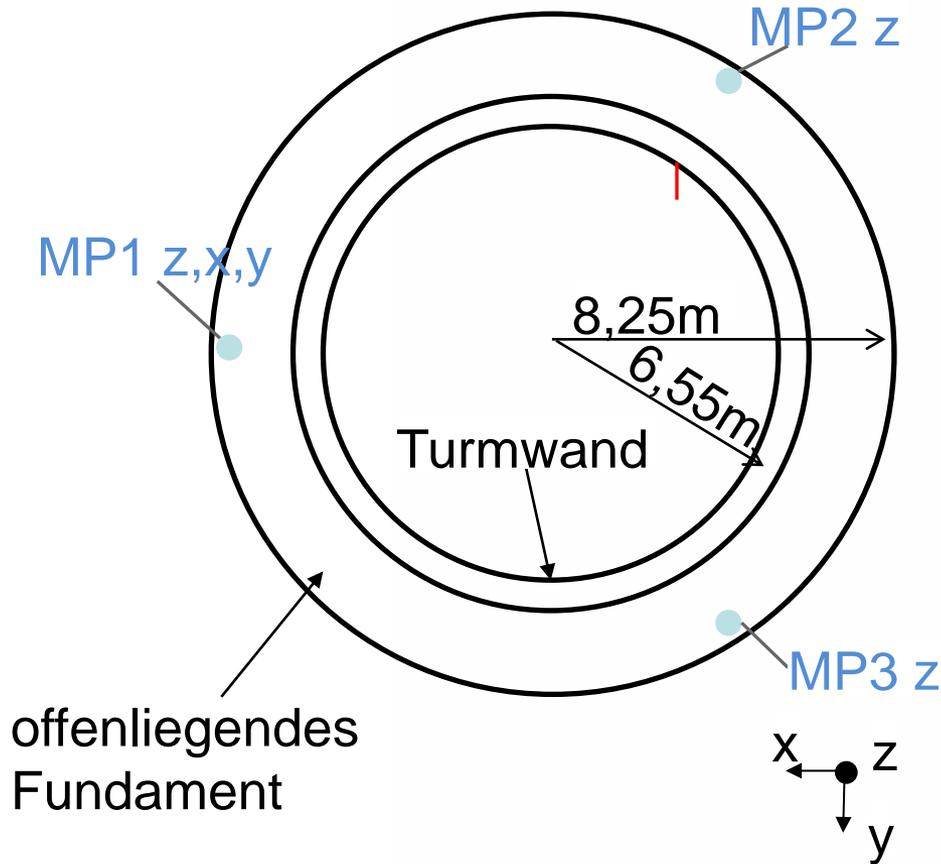


Rechnerische Eigenformen des Turms aus Voruntersuchung



Sensorpositionen vom Fundament bis zur Gondel

Turmmessung – Fundamentmesspunkte



Turmmessung an einer WEA ohne und einer mit Getriebe



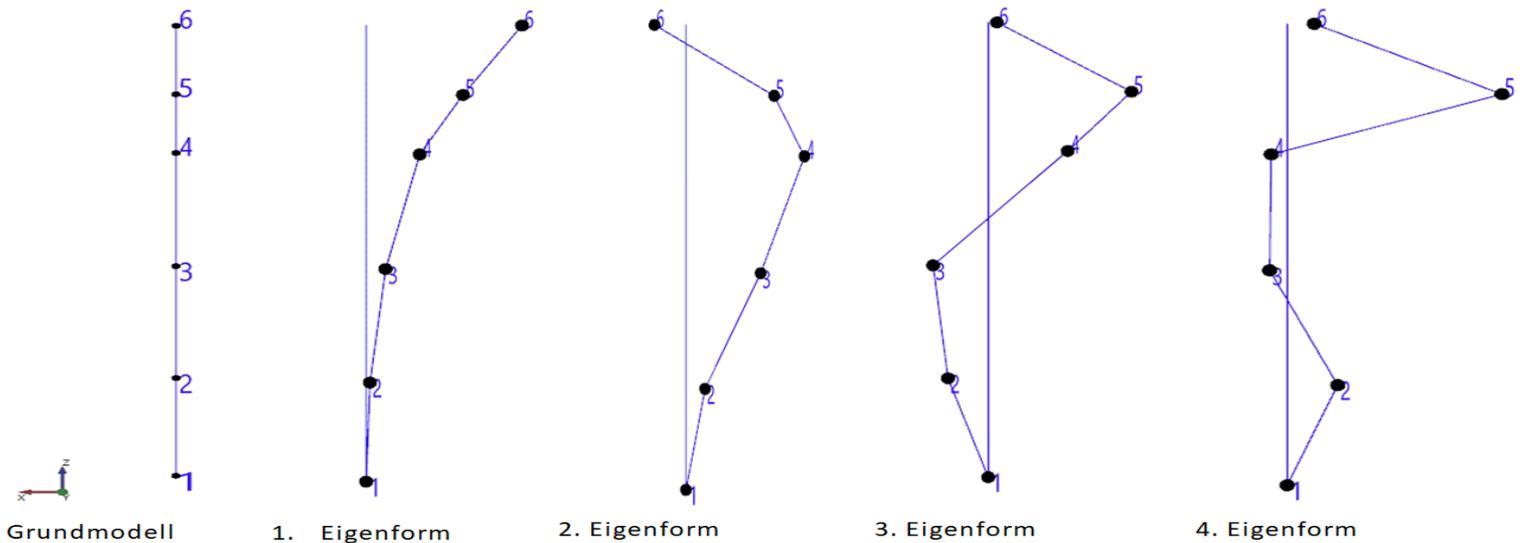
Typ: Enercon E 115



Typ: Vestas V126



Messtechnisch ermittelte Modalformen einer Anlage mit und ohne Getriebe



E115
Nabenhöhe:
146,8m

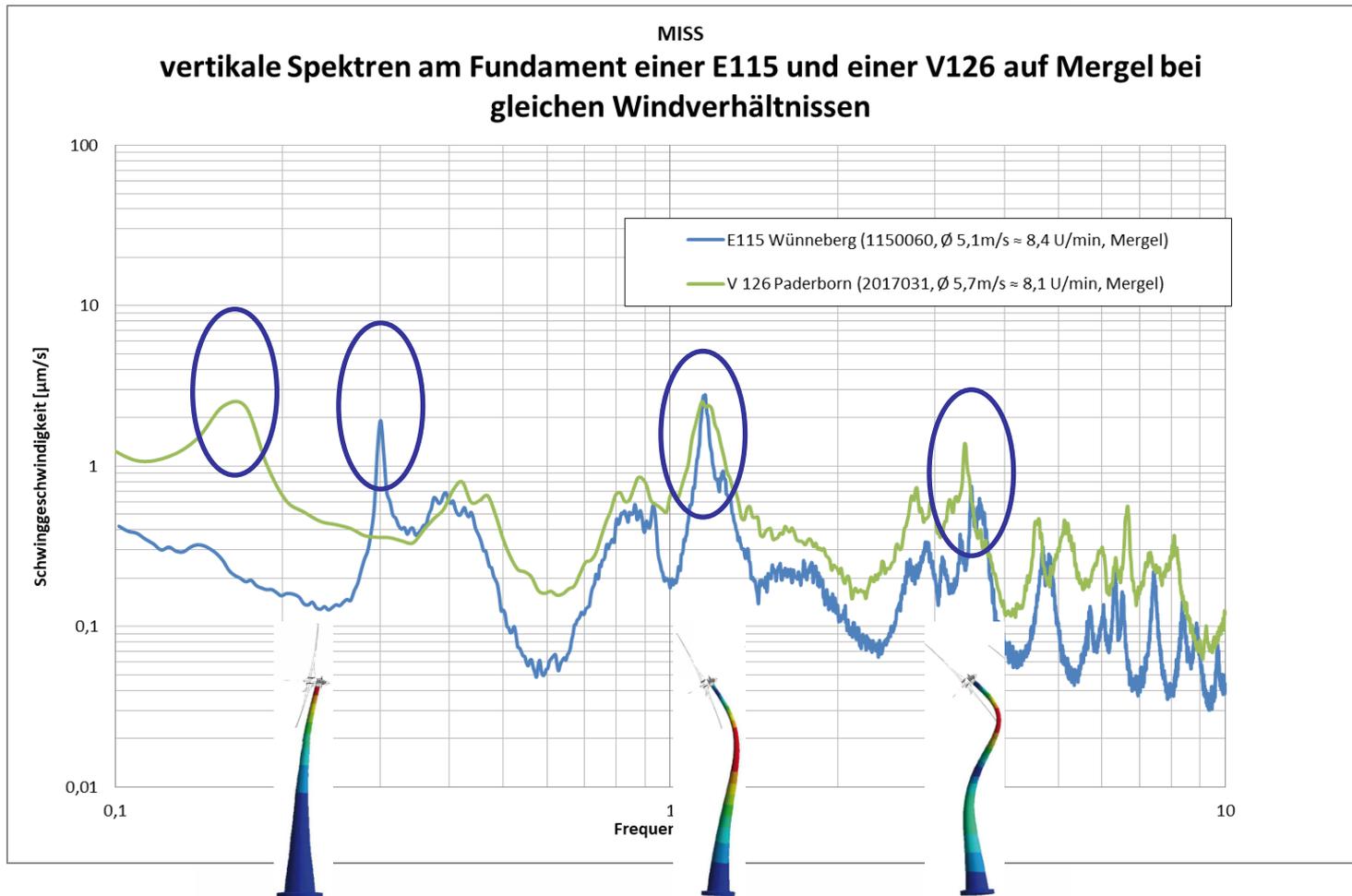
0,29Hz	1,1 Hz & 1,2 Hz	3,25 Hz & 3,5 Hz	6,0 Hz & 7,0 Hz
--------	--------------------	---------------------	--------------------



V126
Nabenhöhe:
137,0m

0,17Hz	1,15 Hz & 1,22 Hz	3,2 Hz & 3,6 Hz	6,6 Hz & 7,3 Hz
--------	----------------------	--------------------	--------------------

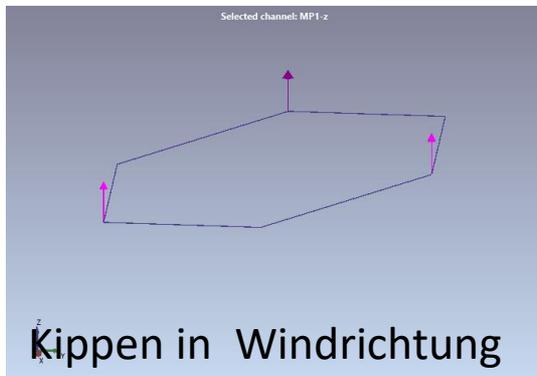
Fundamentalschwingungsamplituden bei vergleichbaren Bedingungen



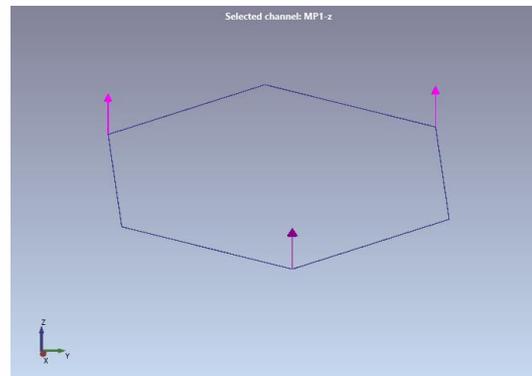


Modalformen des Fundamentes

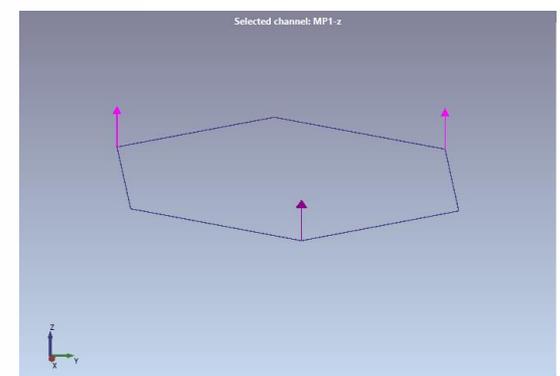
Visualisierung der Fundamentbewegung



0,29 Hz (Mode 1)



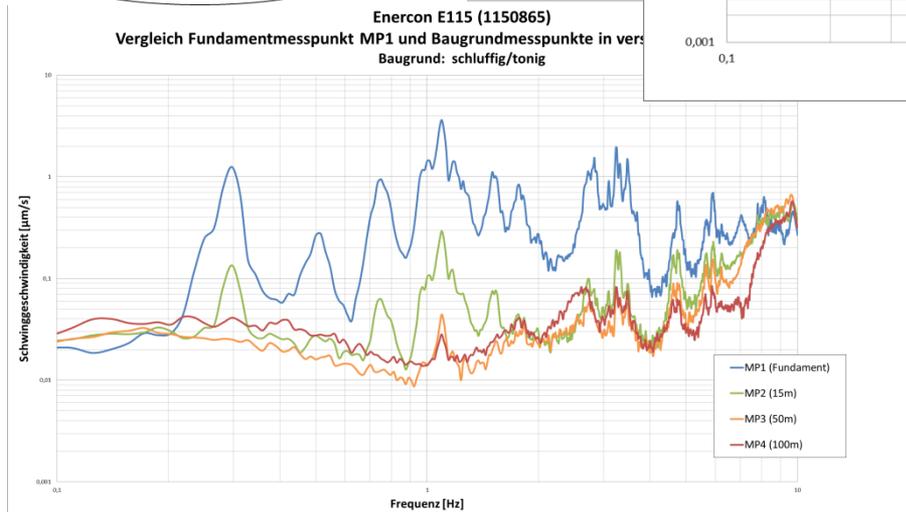
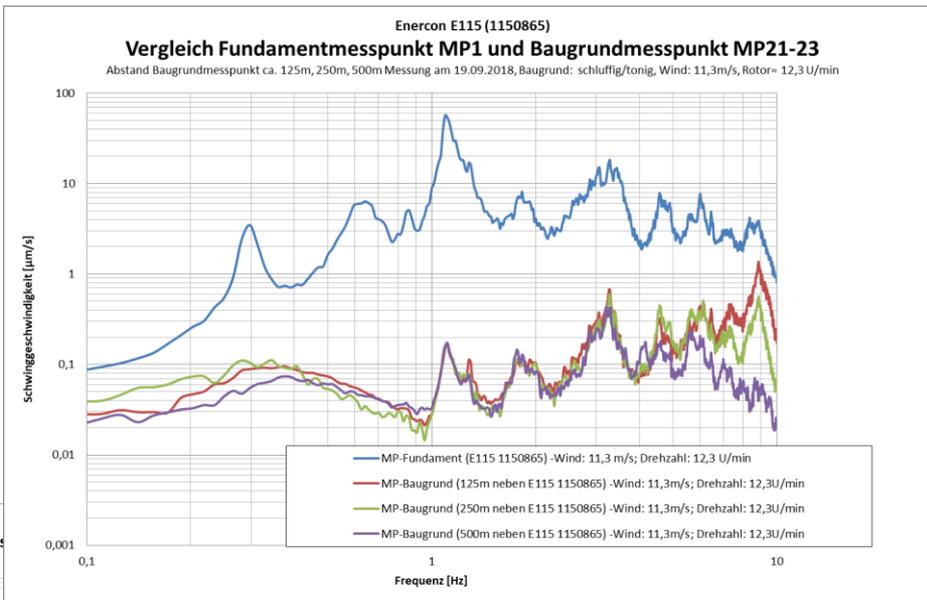
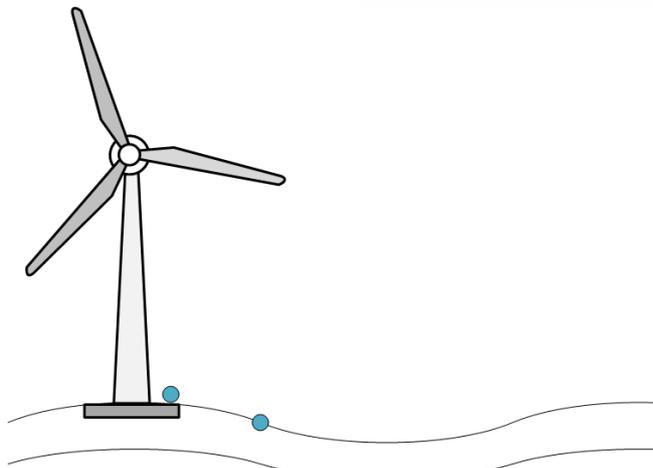
0,58 Hz (3P)



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



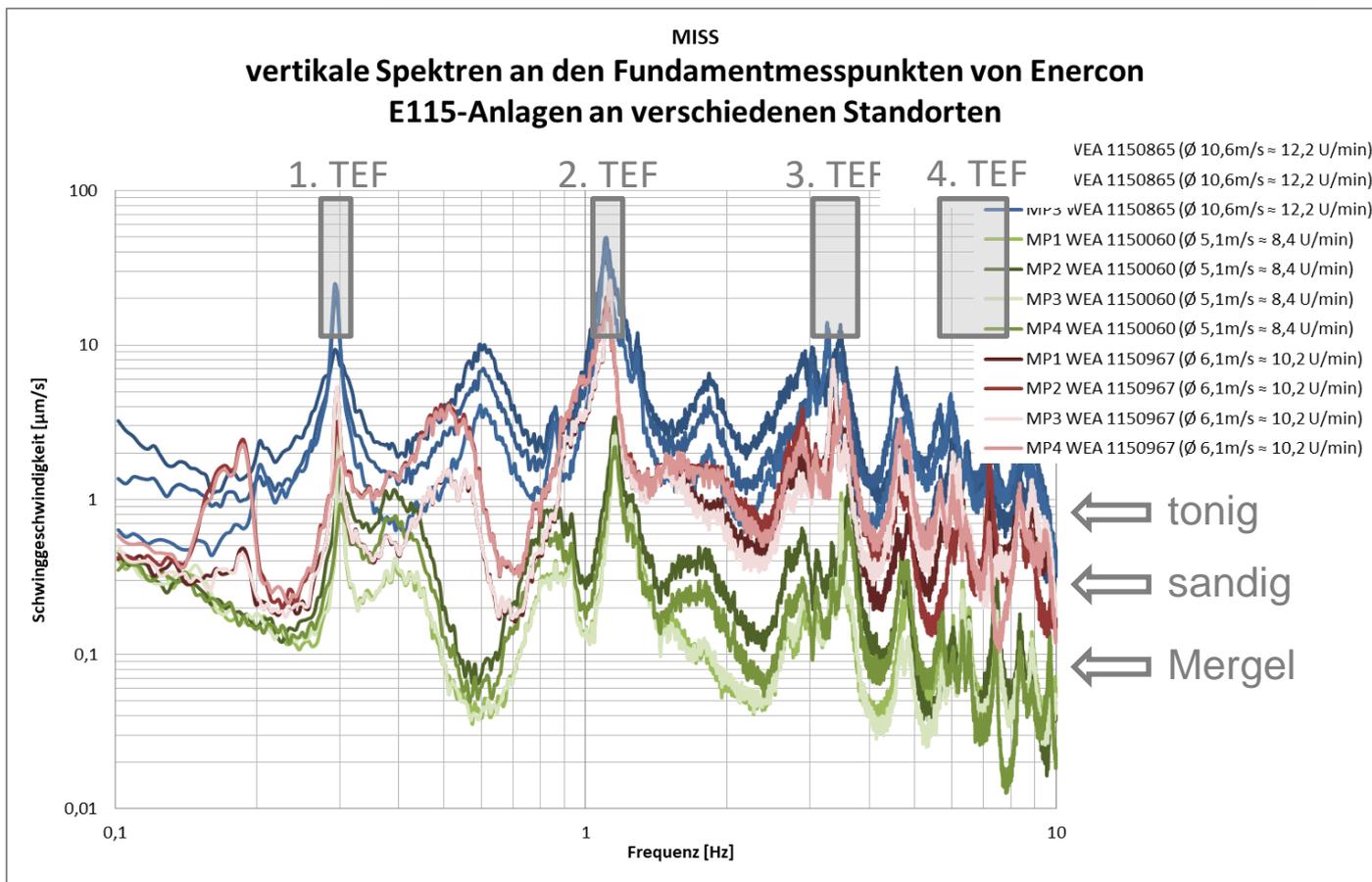
Übergang der Schwingungen vom Fundament auf den Baugrund





Fundamentmessung an verschiedenen E115

Vergleich verschiedener Standorte





AP 1.1

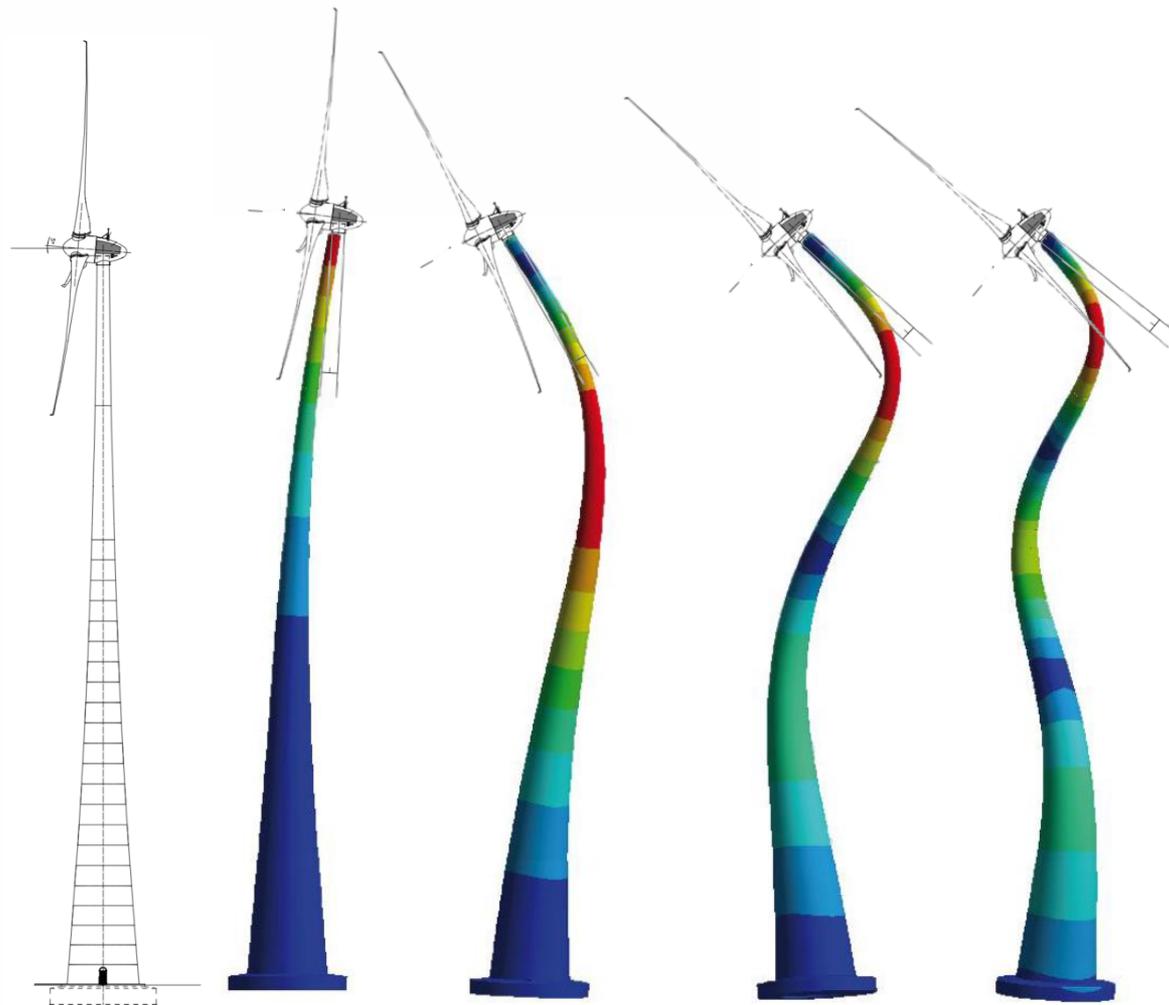
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle



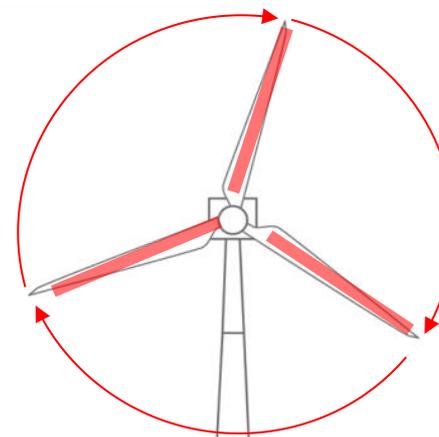
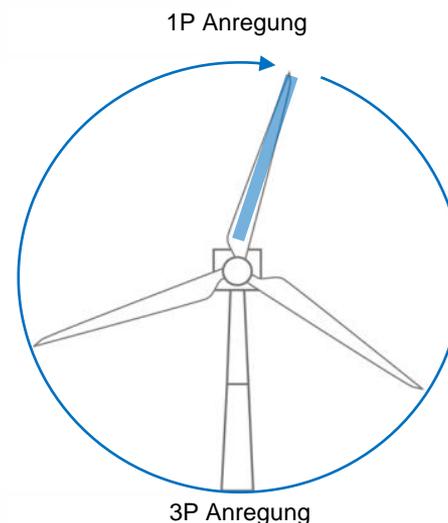
Exkurs – Anregung aus Rotor-Drehung

Rotordrehzahl

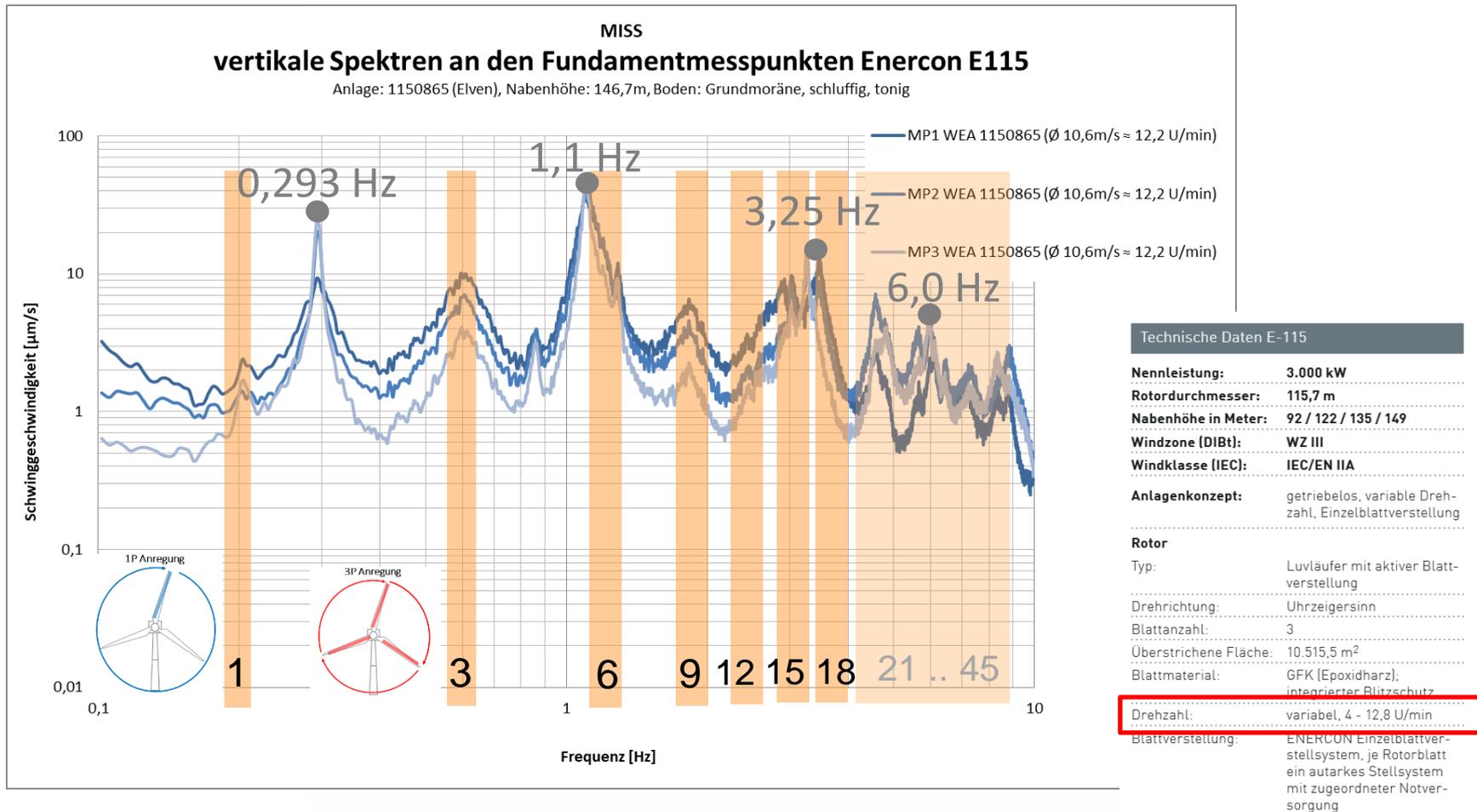
Bereich: 0 – 15 U/min
0 – 0,25 Hz

Rotorblatt-Durchgangsfrequenz

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

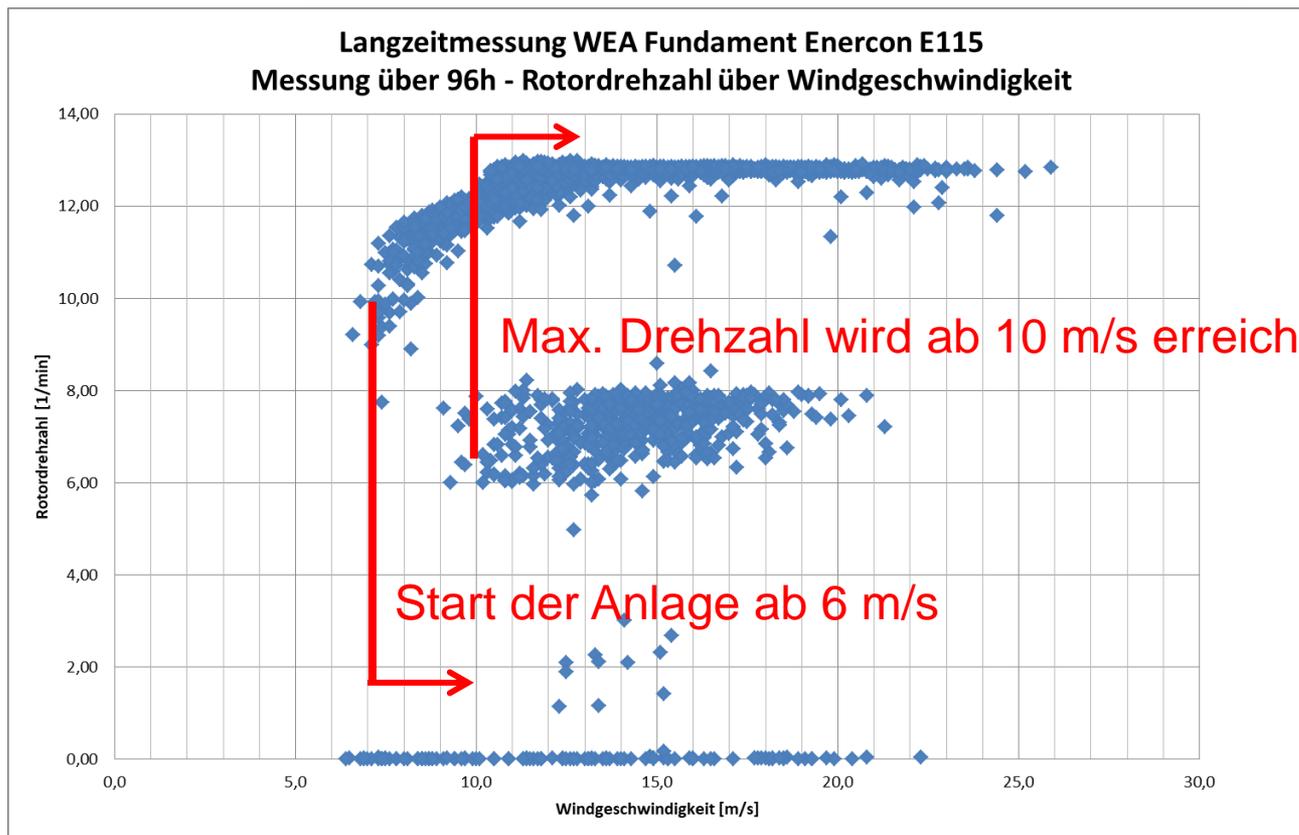


Auswertung im Frequenzbereich - Ergebnisse Fundamentmesspunkte

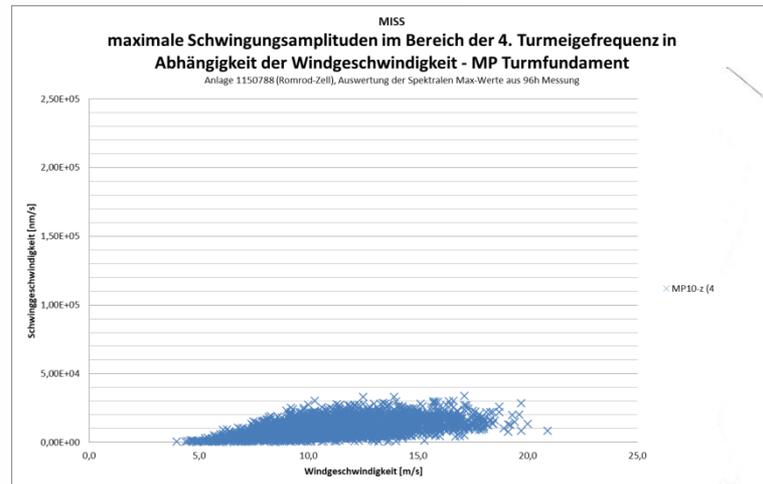
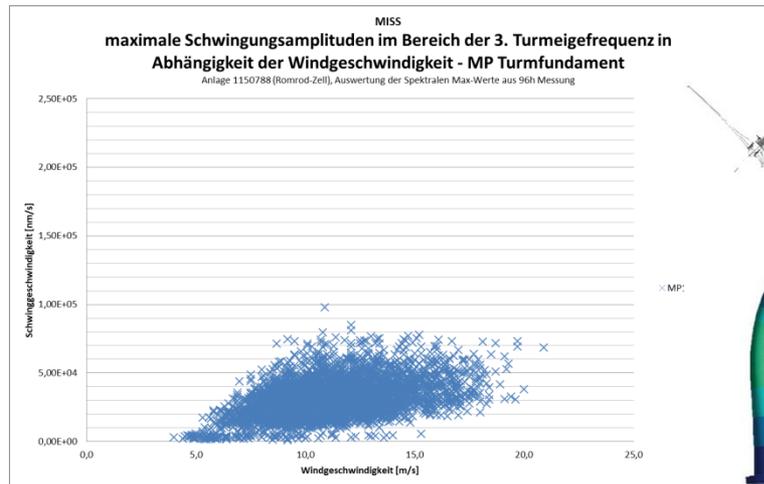
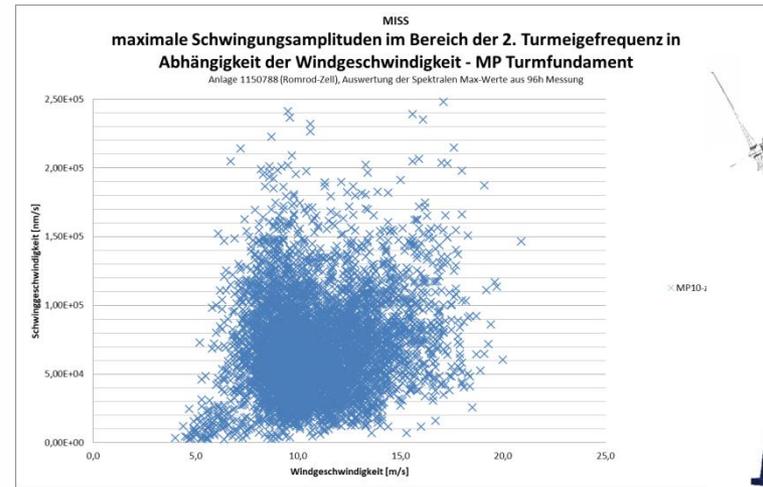
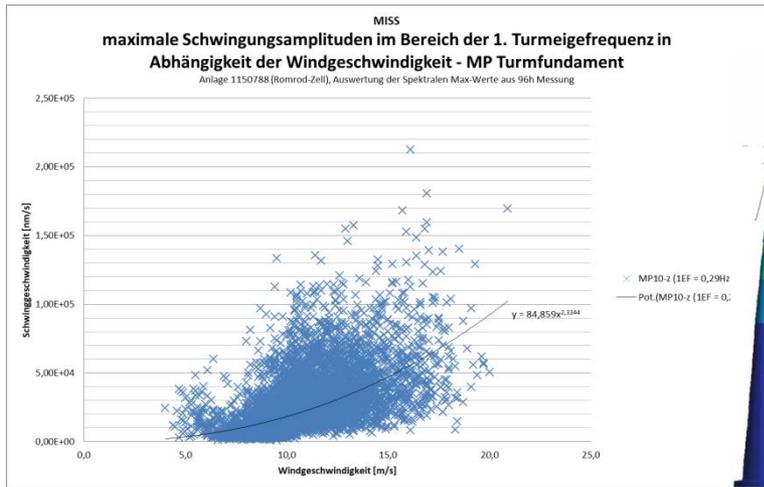


Wovon hängen die Schwingungsamplituden am Turmfundament ab?

Von der Windgeschwindigkeit?



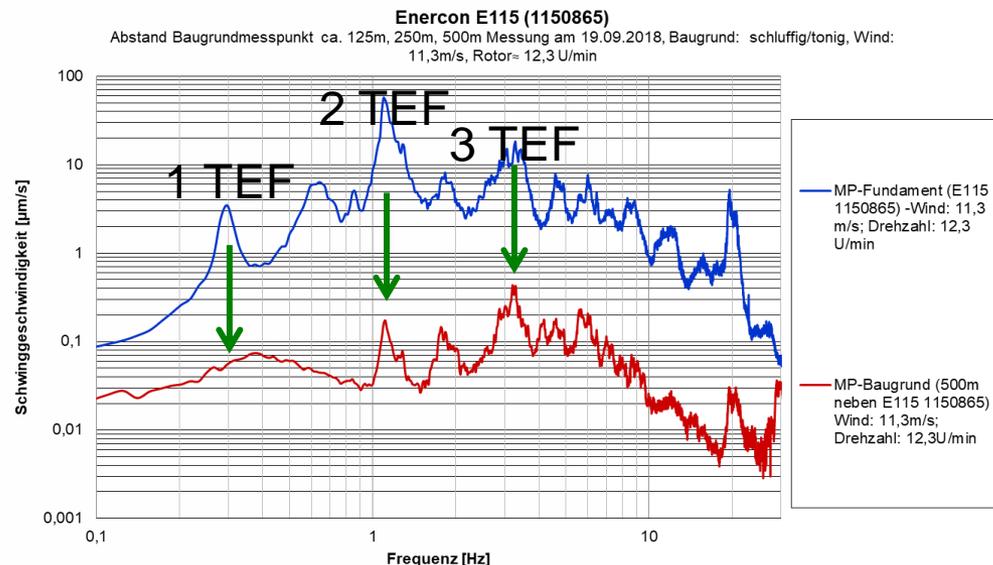
Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit



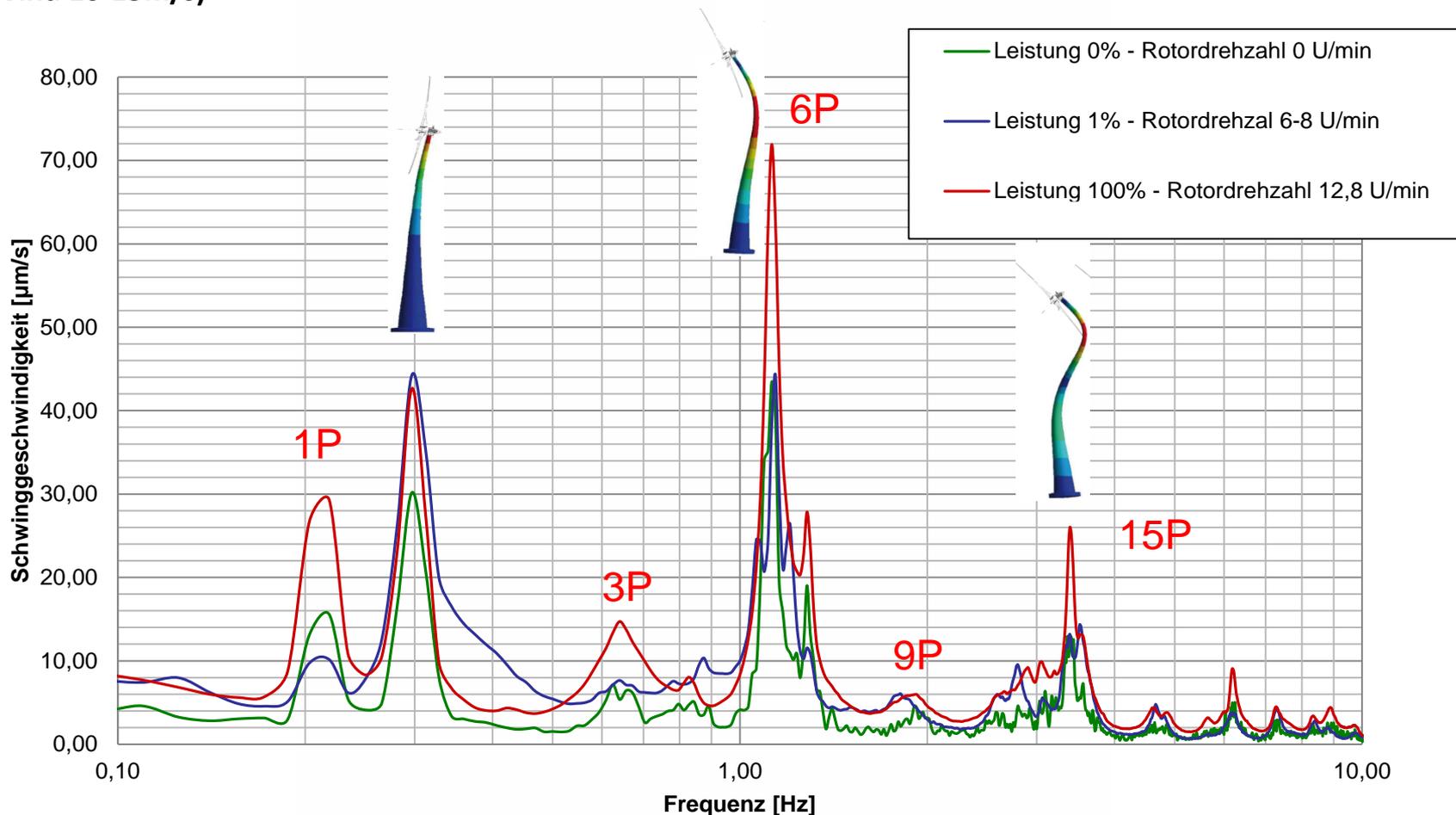
Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

- Die Fundamentalschwingungsamplituden in der ersten Turmeigenfrequenz hängen deutlich von der Windgeschwindigkeit ab und nehmen proportional mit dem Quadrat der Windgeschwindigkeit (v^2) zu.
- In größerer Entfernung zur Windenergieanlage werden jedoch die Schwingungen in den höheren Turmeigenfrequenzen maßgeblich, die nicht so stark von der Windgeschwindigkeit abhängen.

➔ **Untersuchung der Abhängigkeit von der Rotordrehzahl**



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



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 Schwingungsamplituden auf dem Fundament sind maßgeblich abhängig von der Windgeschwindigkeit (insbesondere in der 1.TEF) und Rotordrehzahl (insbesondere in der 2-4.TEF).
- Die Schwingungsamplituden im Bereich der höheren Turmeigenfrequenzen (TEF) hängen in einem gewissen Grad auch von der Windgeschwindigkeit ab, allerdings nicht so stark wie im Bereich der 1.TEF.
- Die Übertragung auf den Baugrund erfolgt durch Fundament-Kippbewegung maßgeblich im Frequenzbereich $f > 1\text{Hz}$.
- Die Wellenausbreitung ist bodenabhängig (Thema eines anderen AP)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. M. Mistler

Dipl.-Ing. P. Meckbach

Baudynamik Heiland & Mistler GmbH
Bergstraße 174, 44807 Bochum

Tel: +49-234-95020-6

www.baudynamik.de

Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Heiland, Dr.-Ing. Michael Mistler