



MISS

Minderung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf seismologische Stationen

Zwischenbericht zum Arbeitsstand AP 1.2 - Teilprojekt BHM

MISS-Projekttreffen (Web-Konferenz)

10.06.2020

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



AP 1.1

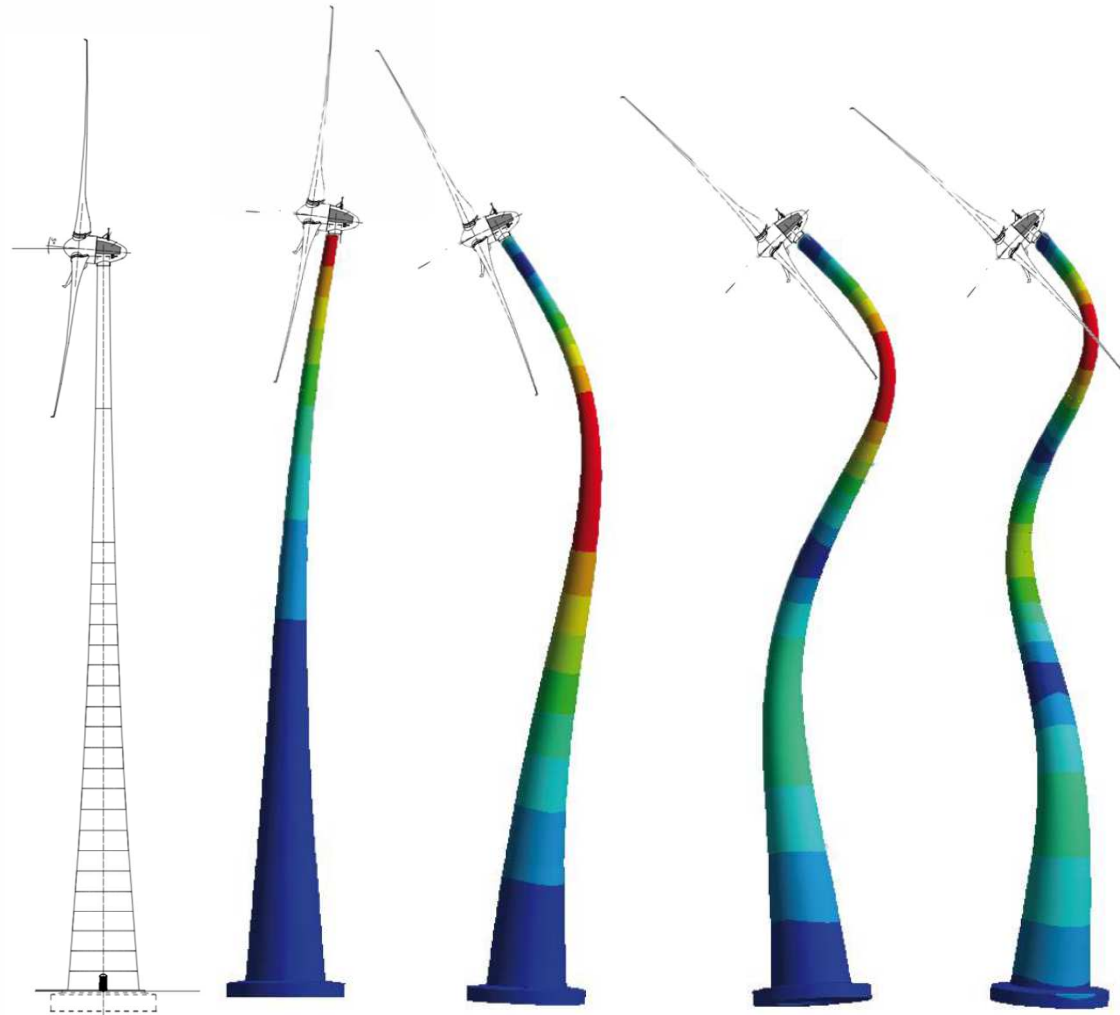
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

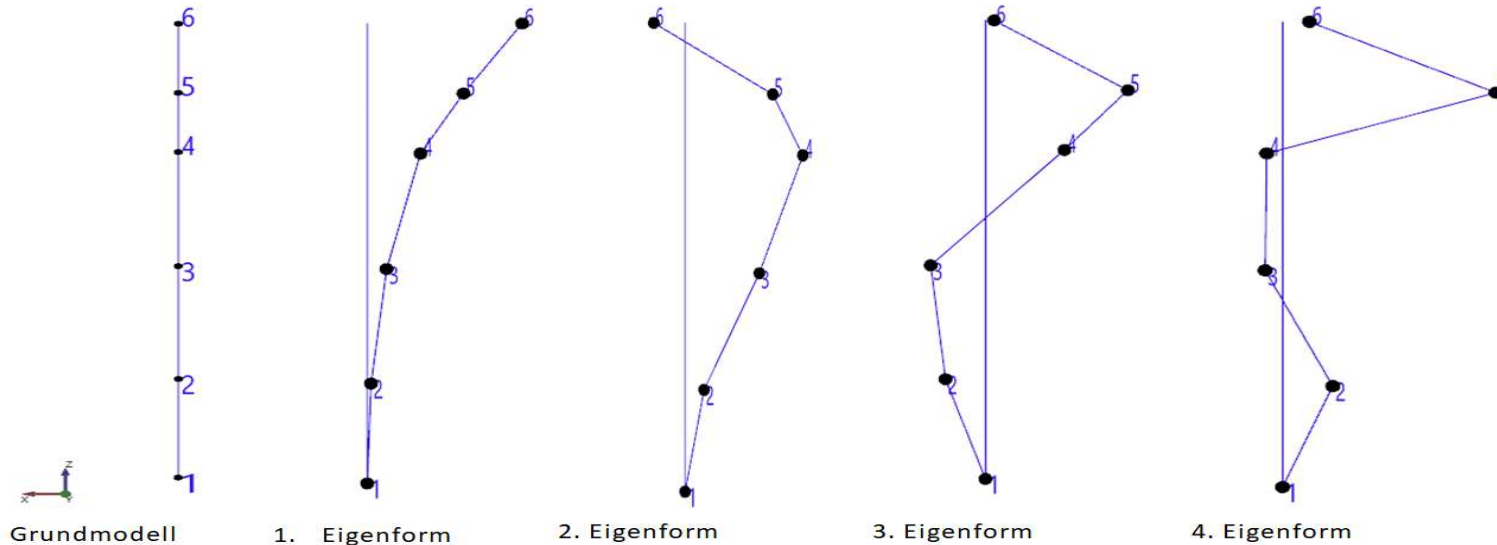
AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle





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

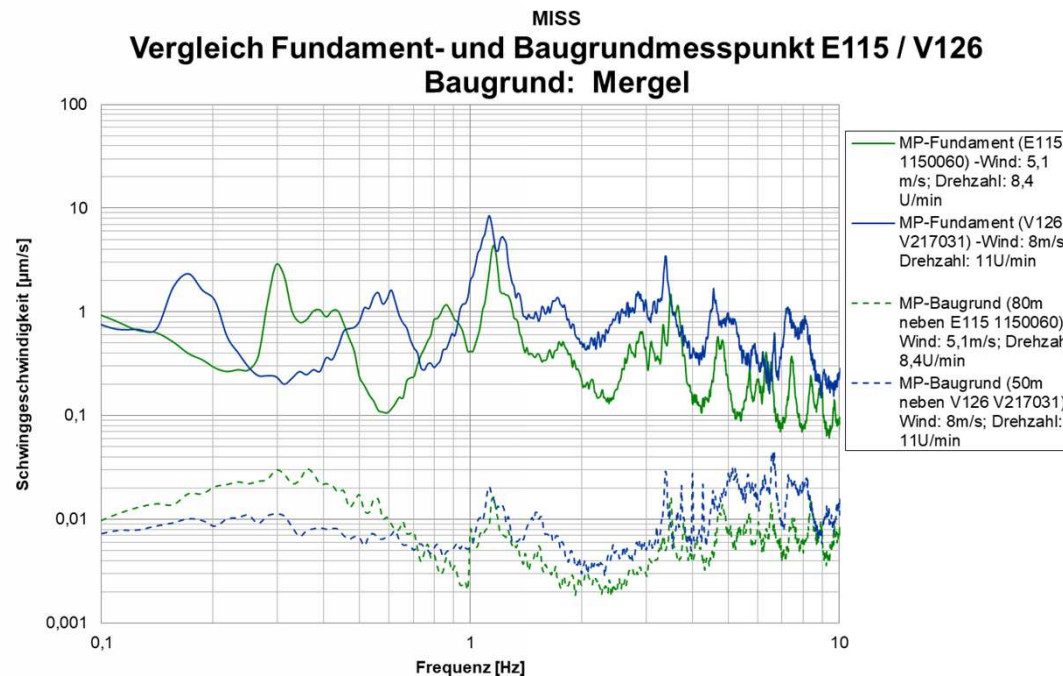
6,6 Hz &
7,3 Hz



Wovon hängen die Schwingungsamplituden am Turmfundament ab?

Von der Bauart der Anlage?

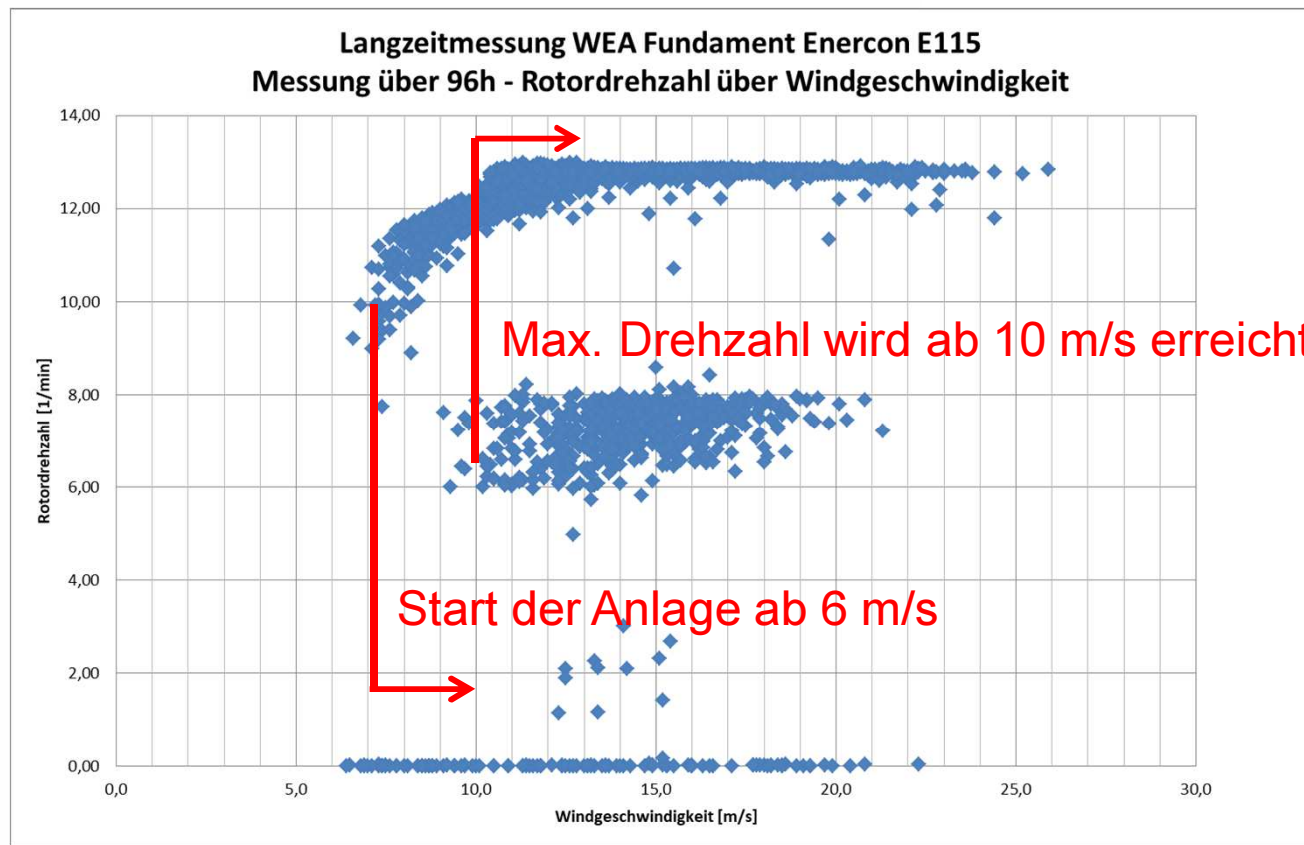
Bei gleicher Leistungsklasse sind nach bisherigen Erkenntnissen die Fundamentalschwingungsamplituden von WEA nicht maßgeblich von den Massenverhältnissen der Anlagen abhängig!





Wovon hängen die Schwingungsamplituden am Turmfundament ab?

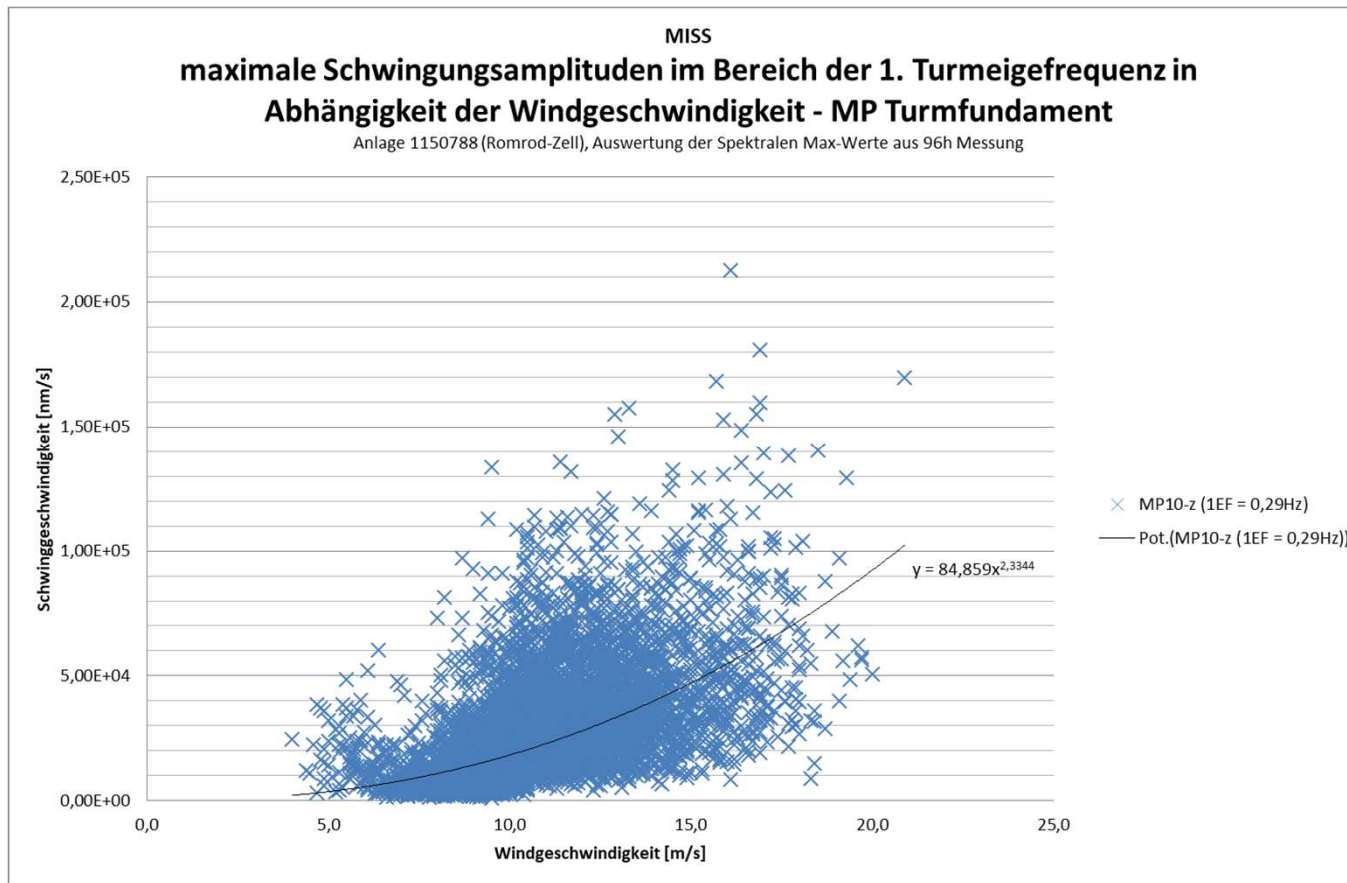
Von der Windgeschwindigkeit?





Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

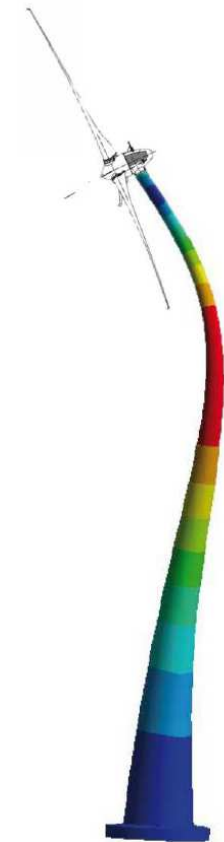
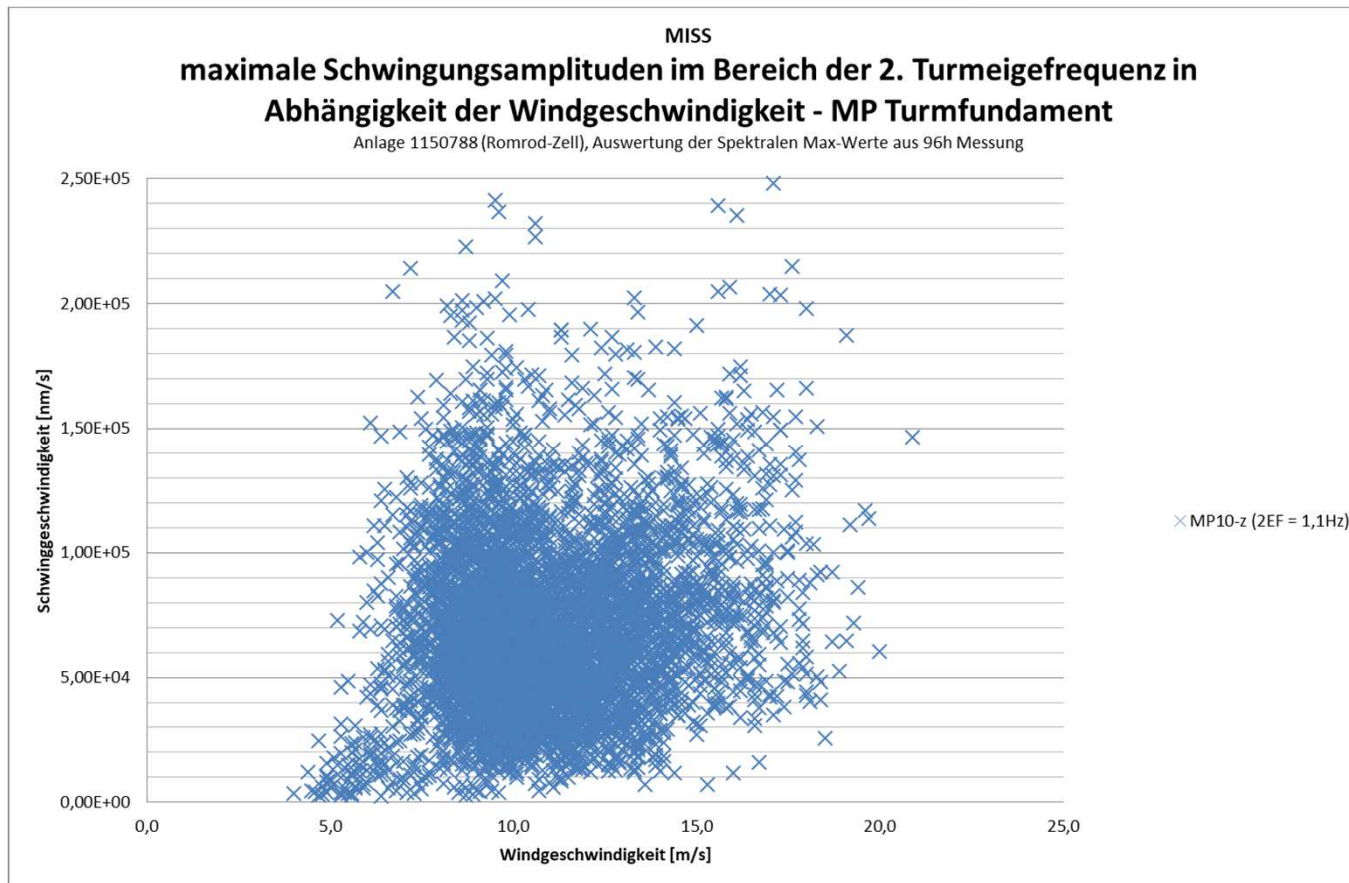
- Auswertung der Messung über 96h für die 1. Turmeigenfrequenz





Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

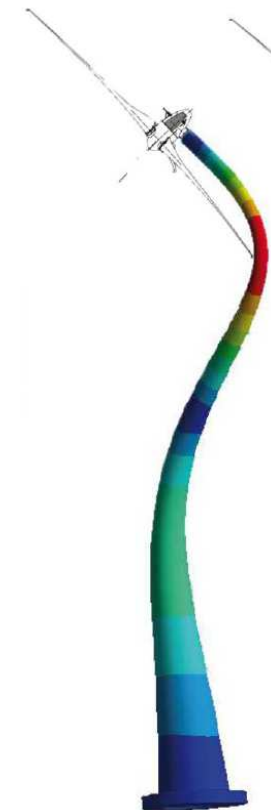
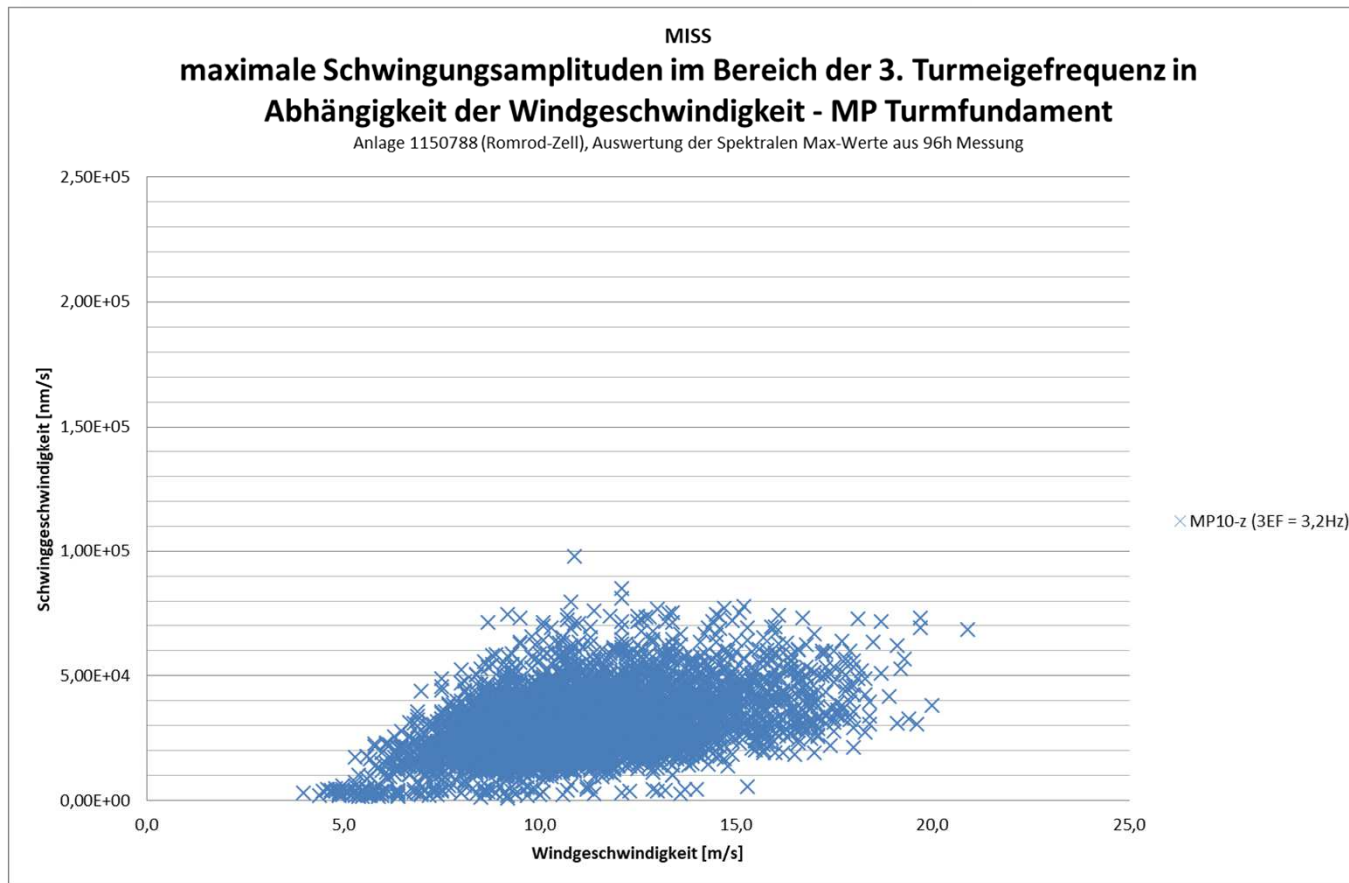
- Auswertung der Messung über 96h für die 2. Turmeigenfrequenz





Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

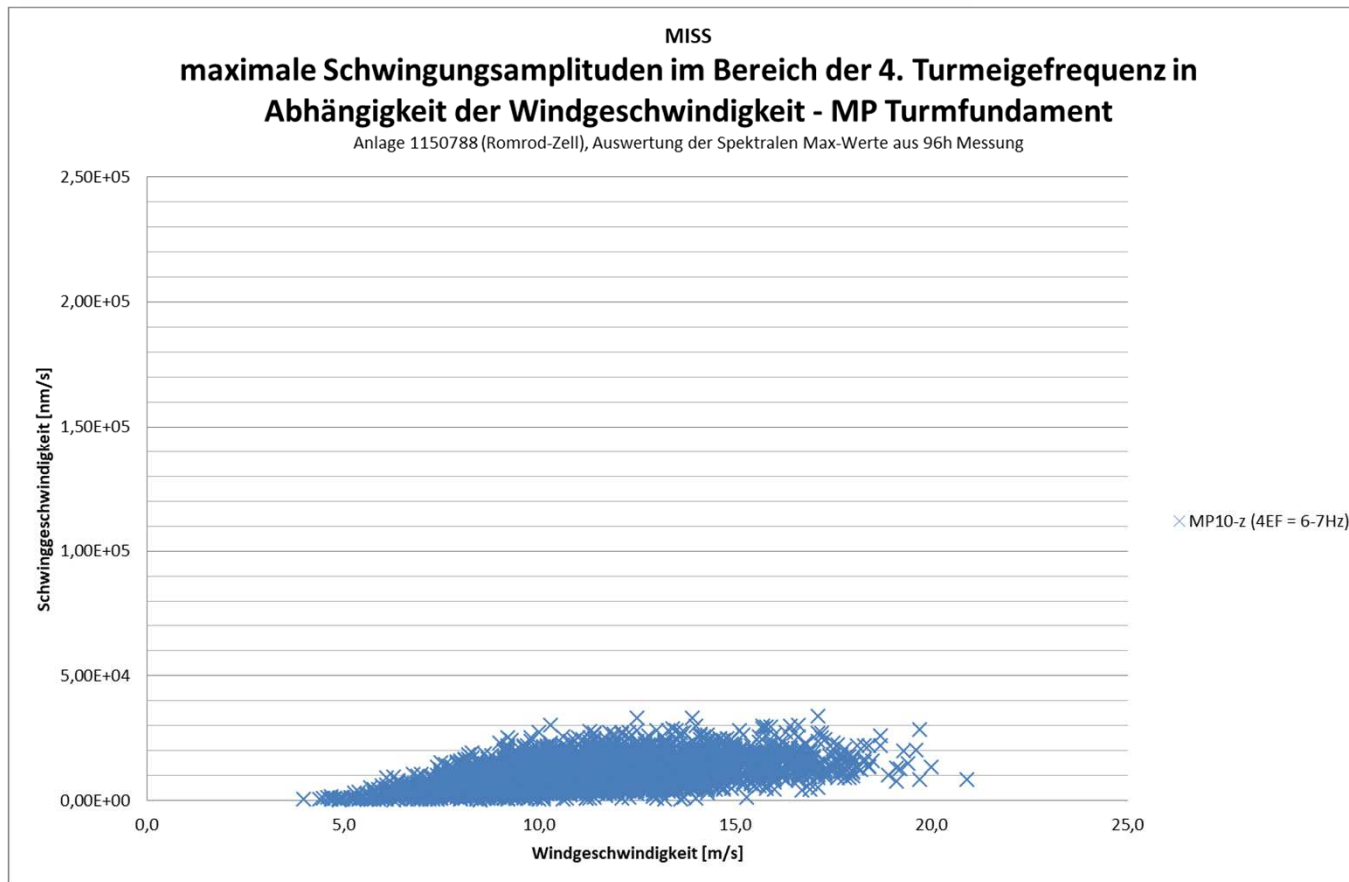
- Auswertung der Messung über 96h für die 3. Turmeigenfrequenz





Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

- Auswertung der Messung über 96h für die 4. Turmeigenfrequenz





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.

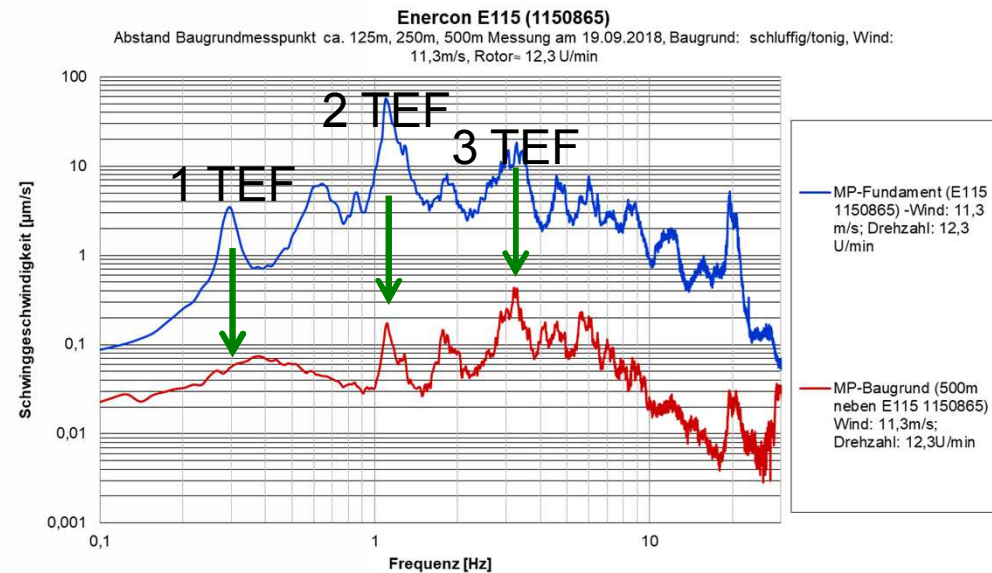


Auch die Schubkraft des Rotors wächst proportional mit dem Quadrat der Windgeschwindigkeit



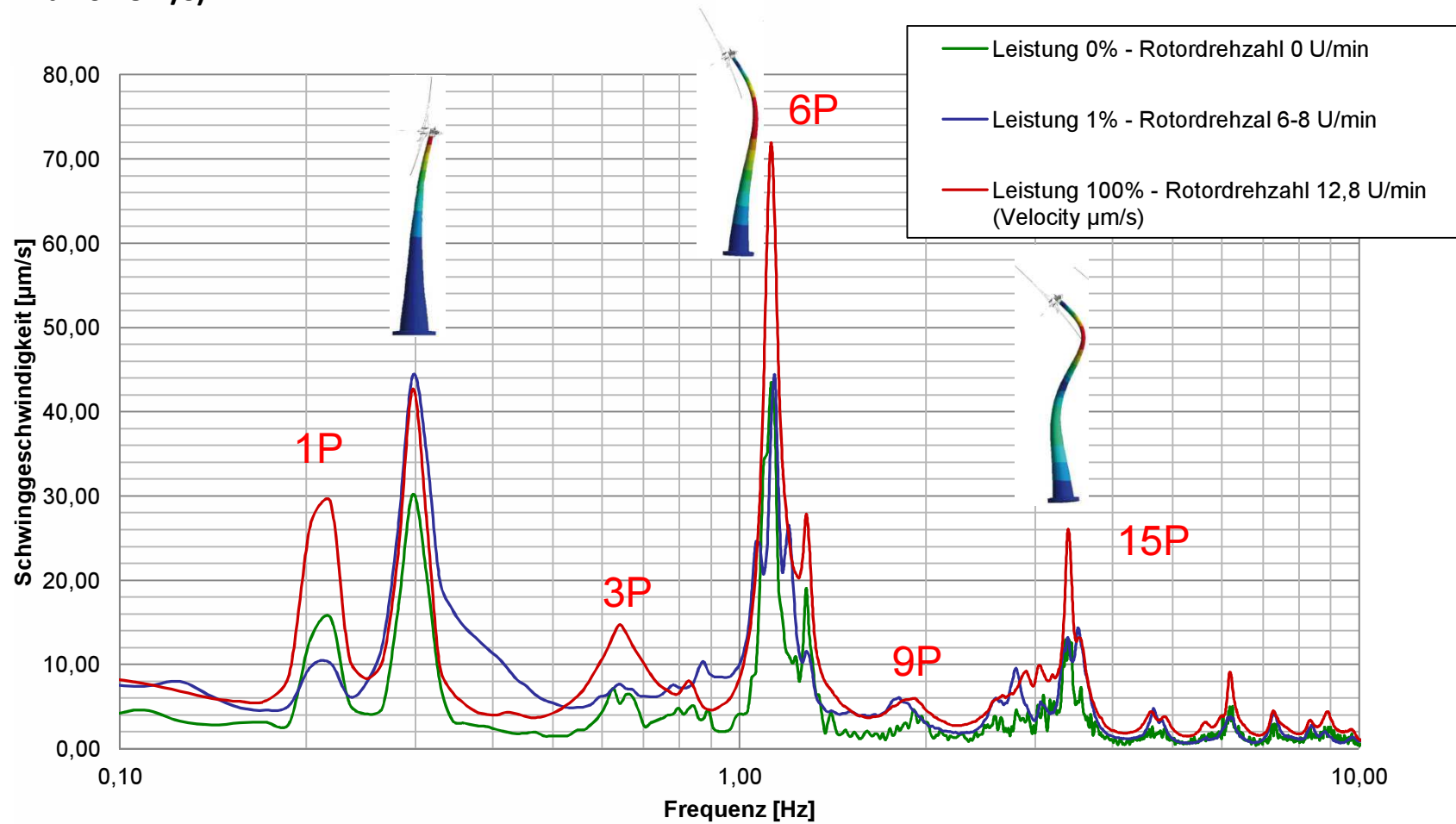
Wovon hängen die Schwingungsamplituden am Turmfundament ab?

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)



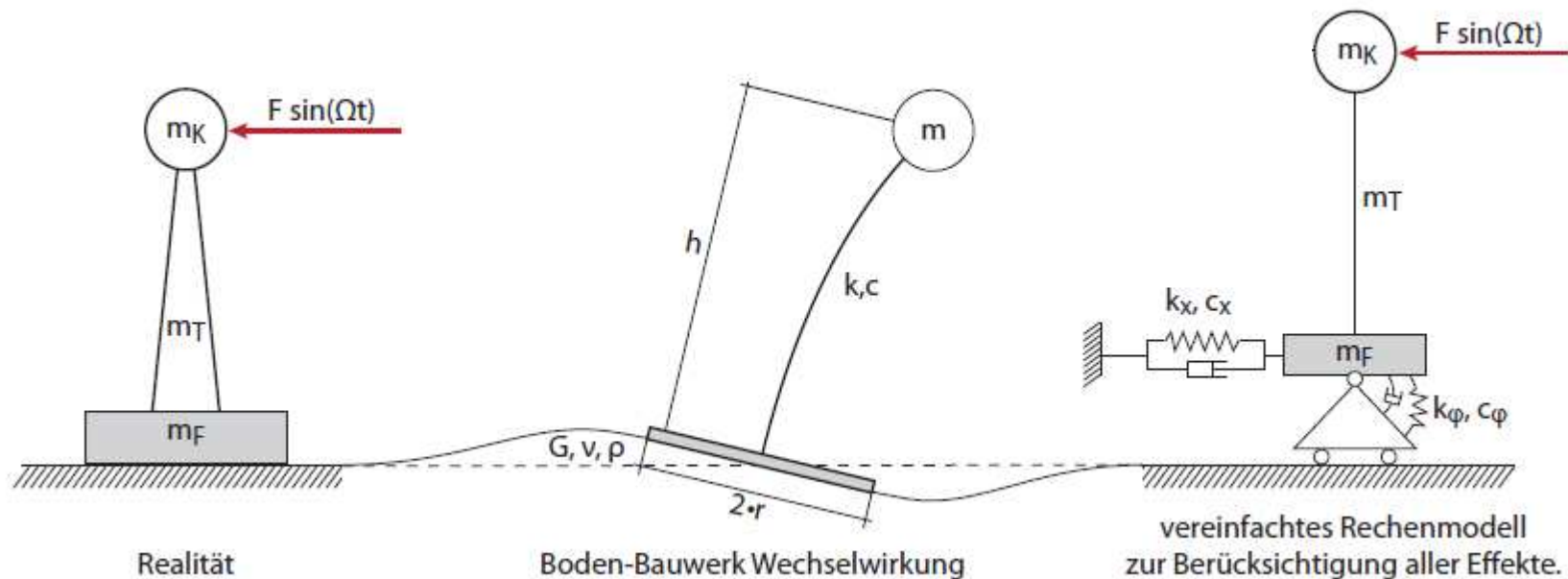


Fundamentalschwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl

- Die Rotordrehzahl hat insbesondere Einfluss auf die Fundamentalschwingungsamplituden in der zweiten und dritten Turmeigenfrequenz.
- Bei geringer Drehzahl fällt zwar die 1. Eigenfrequenz mit der 3P Anregung zusammen, dieser Drehzahlbereich wird in der Regel aber nur kurz beim Hochfahren der Anlage durchfahren. Danach liegt die 3P Anregung über der 1.TEF.
- Bei höherer Drehzahl fällt die 2. Eigenfrequenz mit der 6P Anregung, die 3. Eigenfrequenz mit der 15P Anregung zusammen.
- Höhere Turmeigenfrequenzen hängen nur noch untergeordnet von der Rotordrehzahl ab.

Prognoseansatz

- Erstellung vereinfachtes FE-Modell (Kragarm mit Kopfmasse)
- Aufbringen einer Last am Turmkopf
- Berechnung der Fundamentbewegung infolge der Last

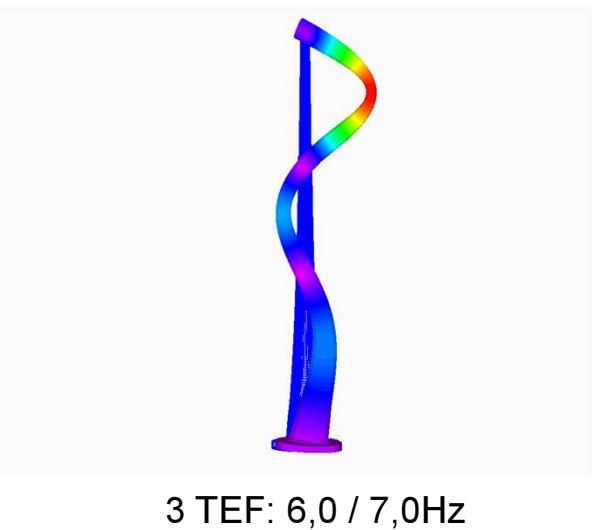
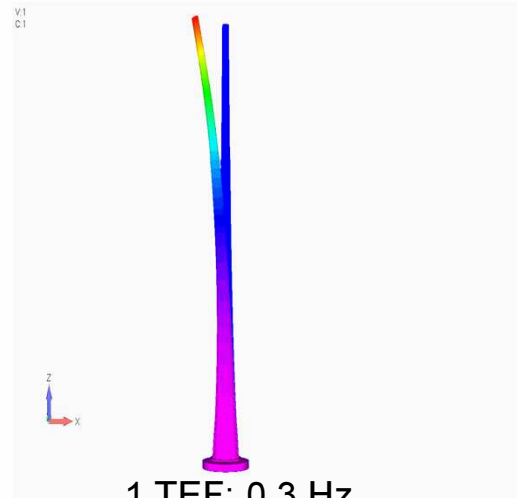
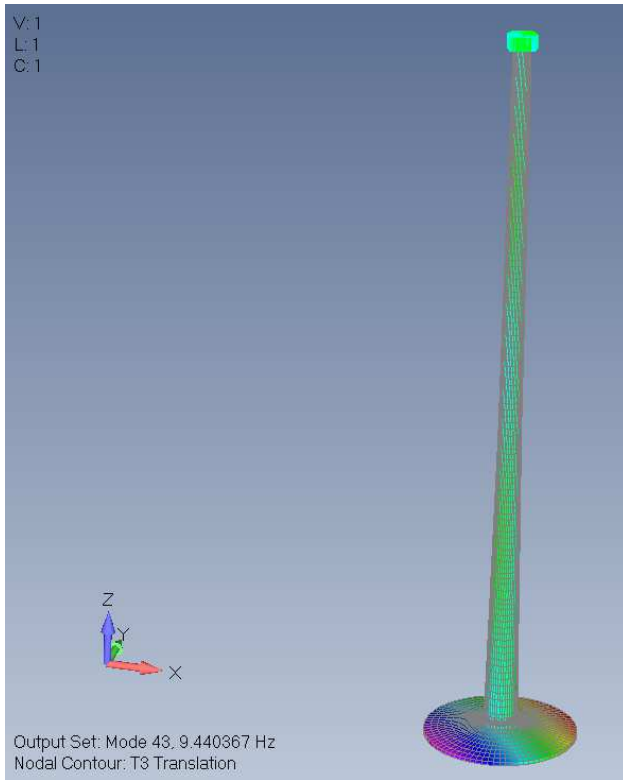


Quelle: Heiland T.: Untersuchung zur Erschütterungsemission von Windenergieanlagen

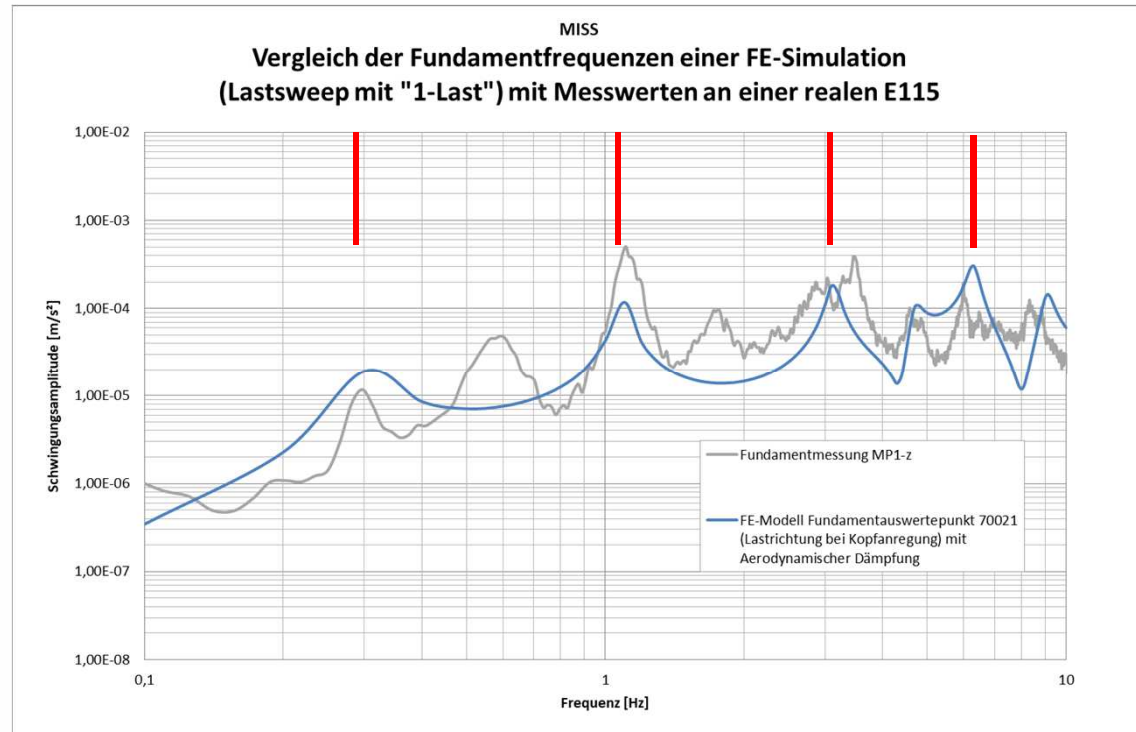
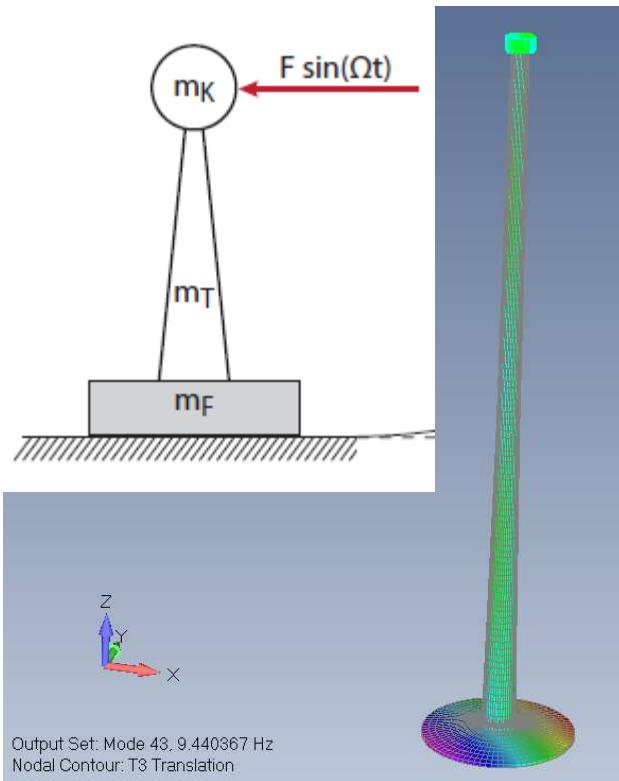


Bearbeitung AP 1.2

Step 1: Erstellung FE-Modell

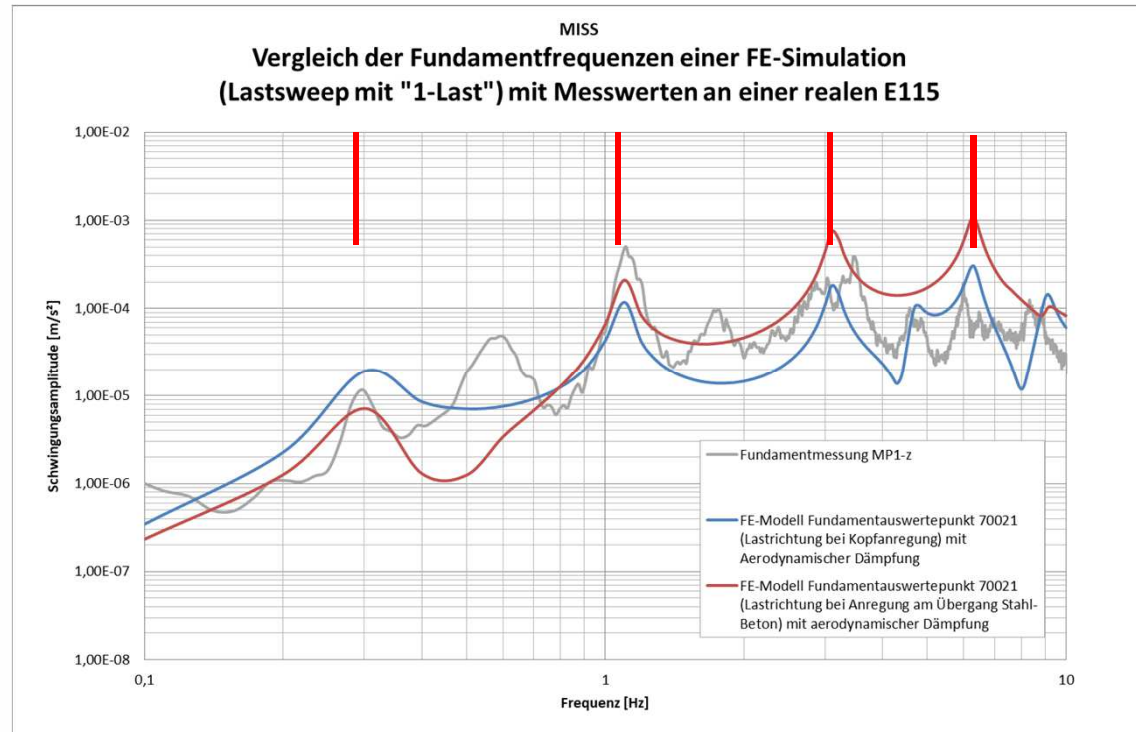
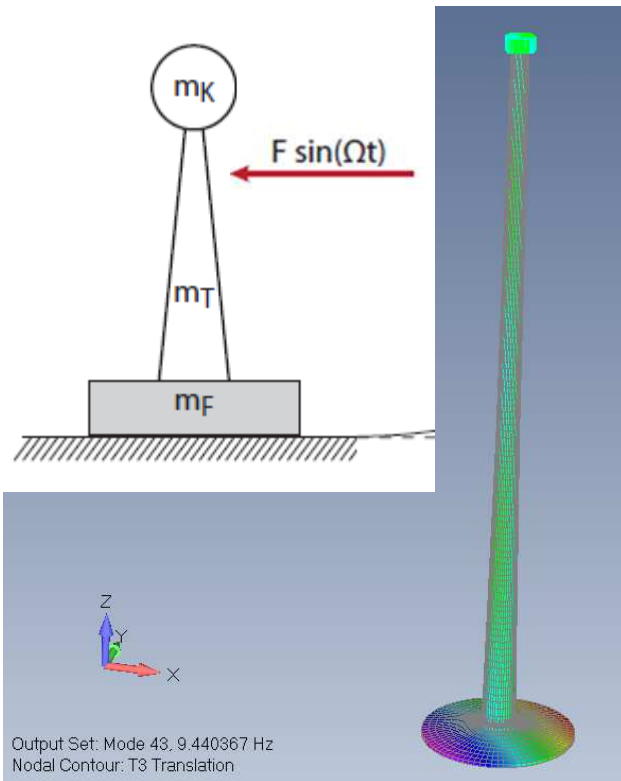


Step 2: Sweep mit einer harmonischen „1-Last“ am Kopfende des Turms



Die Turmeigenfrequenzen können mit den FE-Berechnungen am einfachen Modell auf dem Fundament simuliert werden.

Step 2: Sweep mit einer harmonischen „1-Last“ am Kopfende des Turms



Variation des Lastangriffspunktes zeigt, dass mit tiefer angreifender Last die höheren Turmeigenfrequenzen stärker angeregt werden.



Zusammenfassung der Erkenntnisse:

- Nur die Schwingungsamplituden im Bereich der 1. Eigenfrequenz hängen maßgeblich von der Windgeschwindigkeit ab.
- Schwingungsamplituden im Frequenzbereich der 2., 3. und 4. Eigenfrequenz des Turmes hängen maßgeblich von der Rotordrehzahl ab. Die Drehzahl hängt zwar auch von der Windgeschwindigkeit ab, jedoch gibt es eine Maximaldrehzahl die schon bei relativ geringen Windgeschwindigkeiten erreicht und dann gehalten wird (z.B. Rotordrehzahl gleich bei Wind von 10m/s – 25m/s)
- Die Schwingungsamplituden auf dem Fundament werden in den höheren Turmeigenfrequenzen größer, wenn die Last in einem Abstand x unterhalb der Gondel, und damit nicht über den Triebstrang einwirkt (Ergebnis der FE-Simulation).

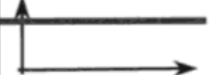
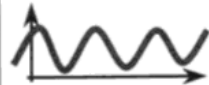

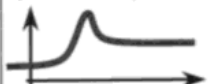


Definition Lastansatz



Step 3: Lastansatz

Welche Kräfte wirken auf eine WEA?

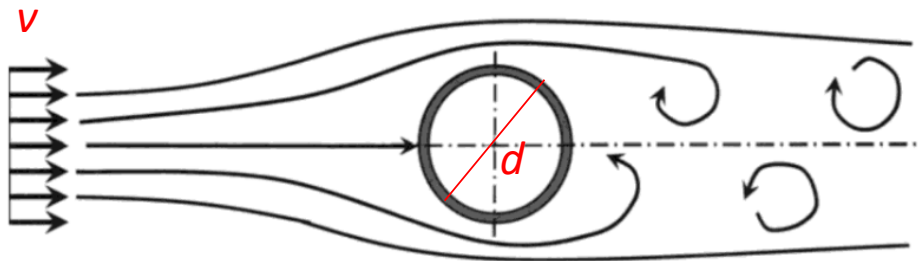
Ursprung / Zeitverlauf	Krafttypus	Herkunft	Betriebszustand
Konstant (quasi-stationär) 	Schwerkraft, Fliehkraft, mittlerer Schub	Gewicht, Rotordrehung, mittlerer Wind	Normalbetrieb
Regelmäßig (periodisch) 	Massenunwucht, aerodynamische Kräfte	Unwucht, Turmvorstau, Schräganströmung, Blattpassage	Normalbetrieb, Störungen
Regellos (stochastisch) 	aerodynamische und hydrodynamische Kräfte	Windturbulenz, Seegang, Erdbeben	Normalbetrieb
Kurzzeitig (transient) 	Reibungs- und Bremskräfte, aerodynamische Kräfte	Stoppen der Anlage, Gieren der Gondel	Manöver, Störungen, Extrembedingun- gen

Quelle: Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, Jochen Twele, Robert Gasch

Step 3: Lastansatz

Turmvorstau:

Vor dem Turm wird die Windströmung abgebremst und umgelenkt. Hinter dem Turm reißt die Strömung dann turbulent ab (Karman'sche Wirbelstraße).



Quelle: Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, Jochen Twele, Robert Gasch

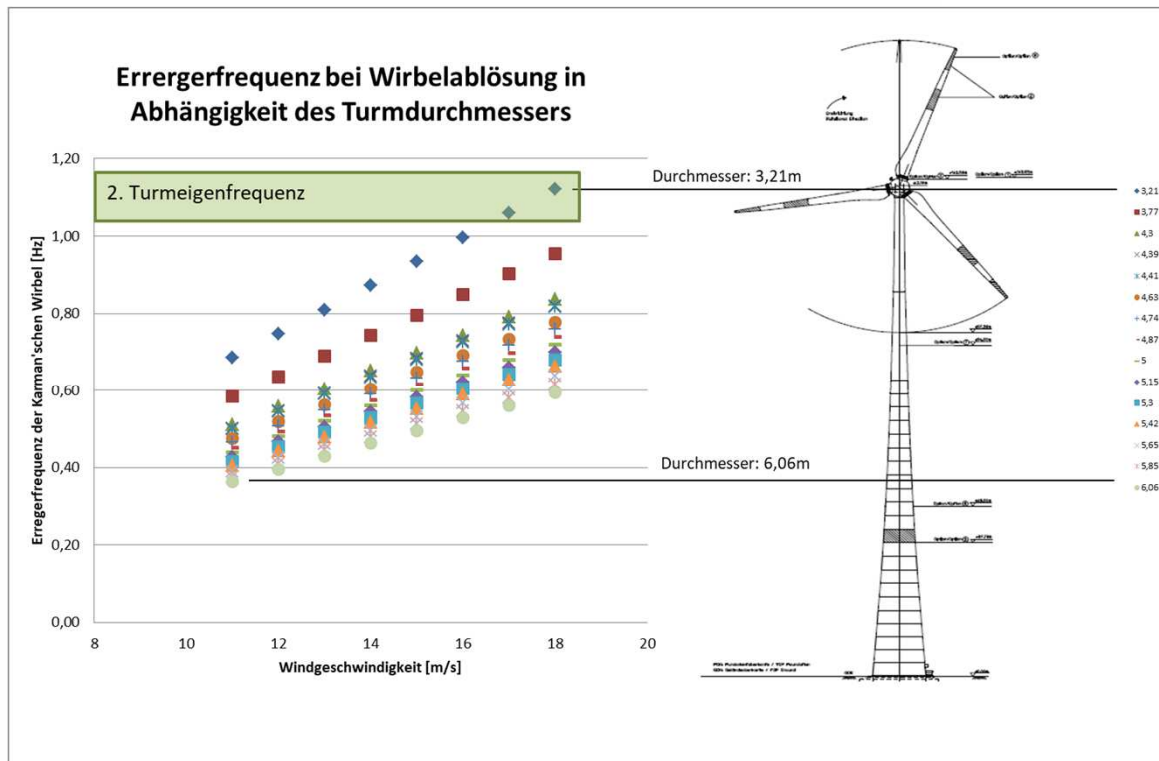
Die Ablösungen treten pulsierend rechts und links des Turmes auf. Dadurch kann es zu einer Queranregung des Turmes kommen. Für die Erregerfrequenz gilt bei einem Kreisquerschnitt vereinfacht die Beziehung:

$$f = 0,2 \cdot \frac{v}{d}$$



Step 3: Lastansatz

Beispiel Turmvorstau $f = 0,2 \cdot \frac{v}{d}$



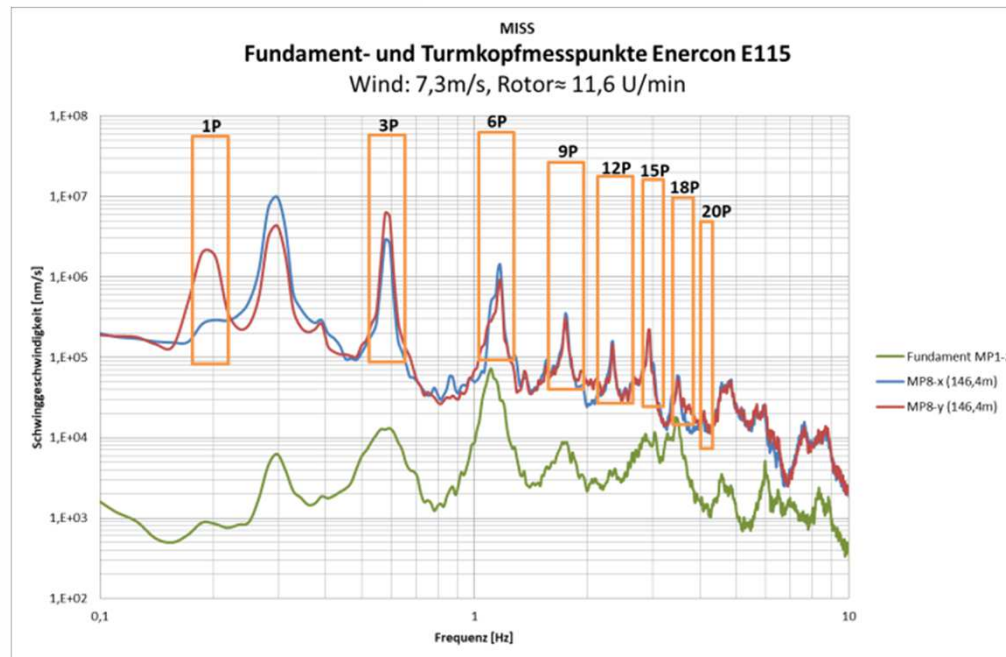
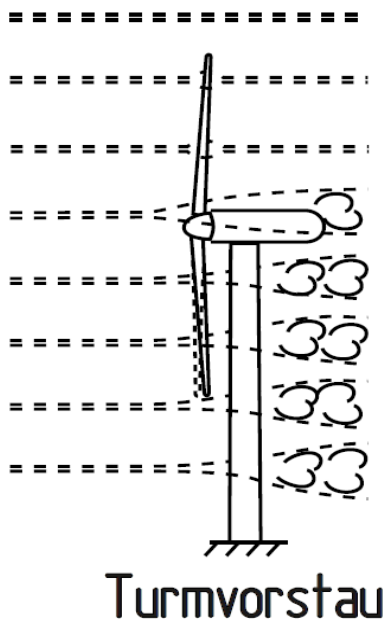
➔ Karman'sche Wirbel sind zumindest für Türme mit großen Durchmessern nicht maßgeblich.



Step 3: Lastansatz

Turmvorstau:

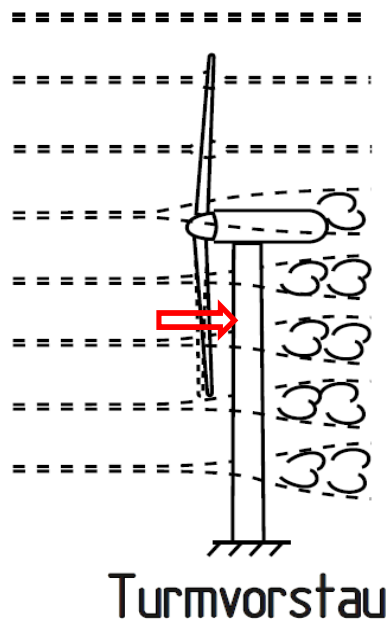
Neben der Wirbelablösung kommt es durch den Turmvorstau zu einem kurzzeitigen Einbruch der aerodynamischen Kräfte am Blatt, wenn dieses am Turm entlang streicht. Dies führt zu einer 1P, 3P, 6P, 9P ... Anregung die auch bei hohen Ordnungszahlen die Turmstruktur noch deutlich anregen.



Step 3: Lastansatz

Beispiel Turmvorstau:

Neben der Wirbelablösung kommt es durch den Turmvorstau zu einem kurzzeitigen Einbruch der aerodynamischen Kräfte am Blatt, wenn dieses am Turm entlang streicht. Dies führt zu einer 1P, 3P, 6P, 9P ... Anregung deren Heftigkeit mit der Ordnungszahl nur schwach abnimmt.



Die Untersuchung am FE-Modell unterstreicht, dass die Kräfte, die zu den Amplituden in den höheren Turmeigenfrequenzen führen, nicht an der Gondel (Nabe) sondern tiefer am Turm angreifen.

Step 3: Lastansatz

Das führt zu folgendem Prognosemodell

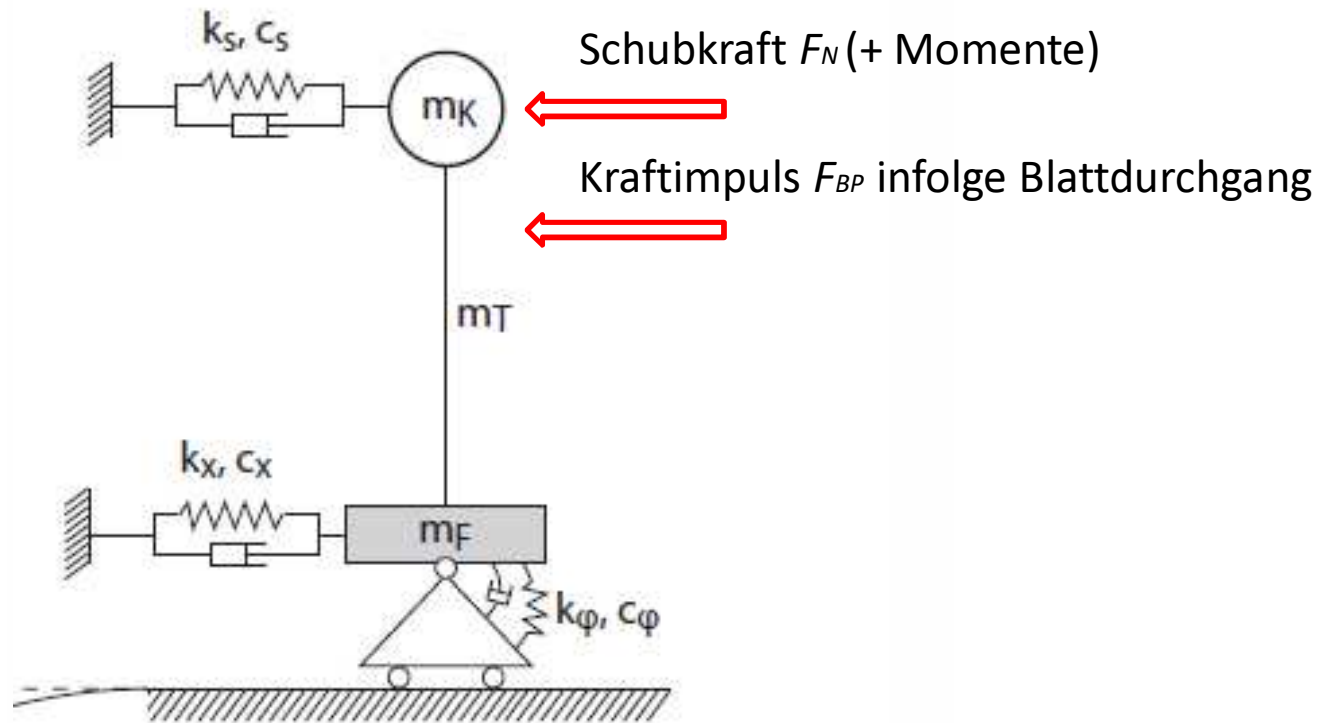
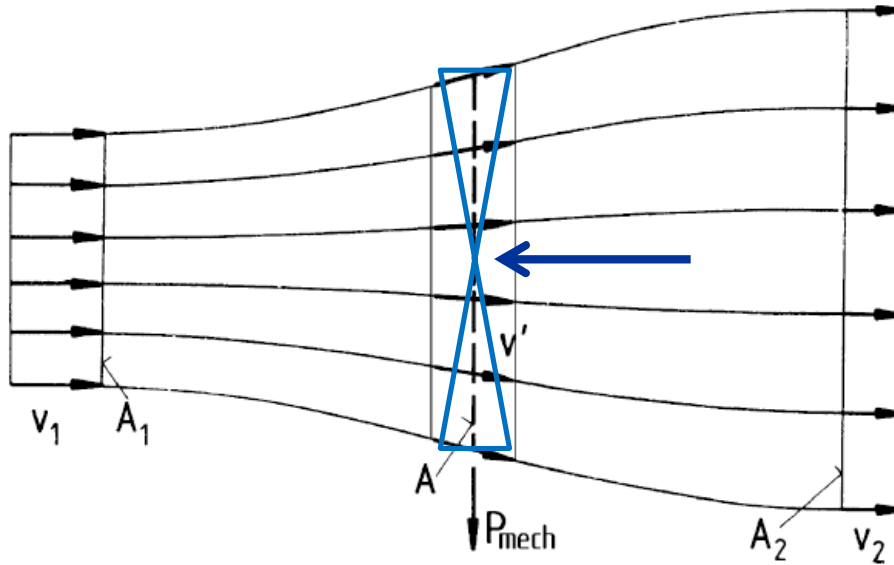


Bild-Quelle: Heiland T.: Untersuchung zur Erschütterungsemission von Windenergieanlagen

Step 3: Lastansatz für Schubkraft F_N

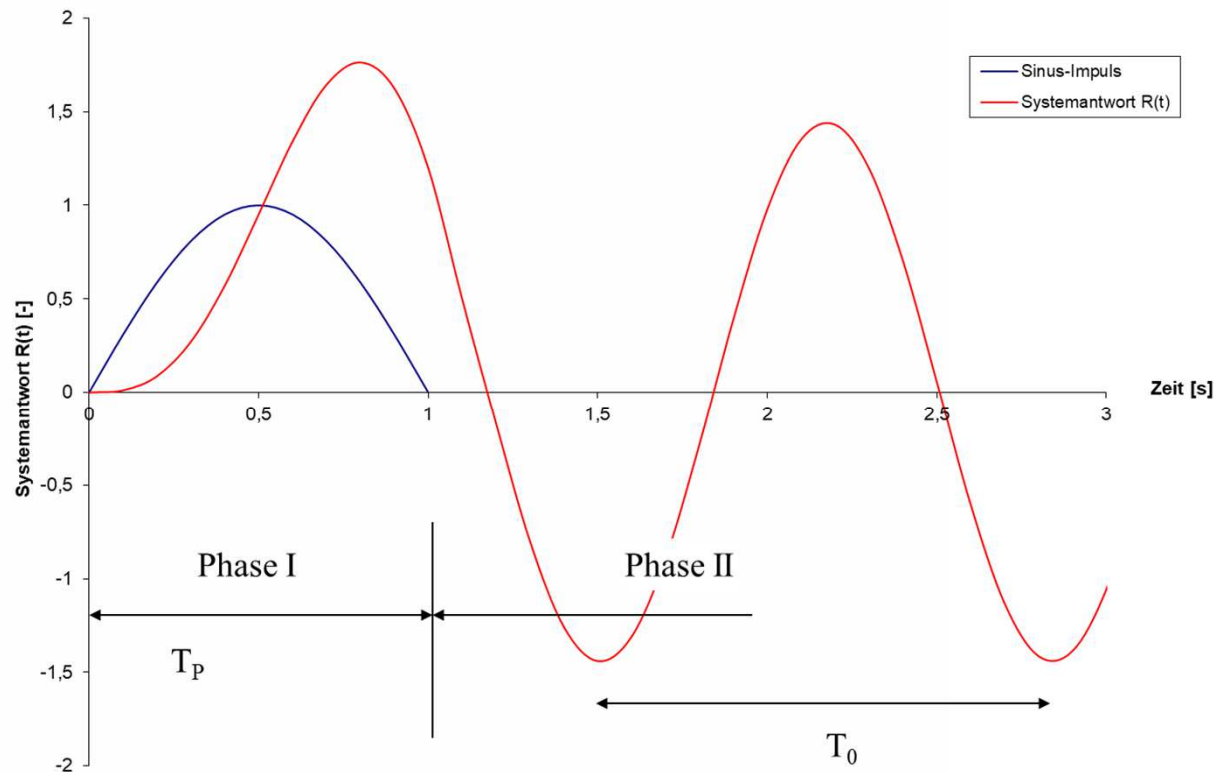


$$F_N = A_{Rotor} \cdot \frac{4}{9} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_1^2$$



Step 3: Lastansatz für den umlaufperiodischen Kraftimpuls F

Durch den Rotor wird der Turm immer wieder impulsartig angeregt und schwingt dann in den angeregten Eigenfrequenzen aus.





Step 3: Lastansatz für umlaufperiodische Rotorkraft F

$$F(t) = F_{BP} + \sum_{i=1}^n \Delta F_{BPi} \times \sin(2 \cdot i \cdot \pi \cdot f_p \cdot t - \varphi_i)$$

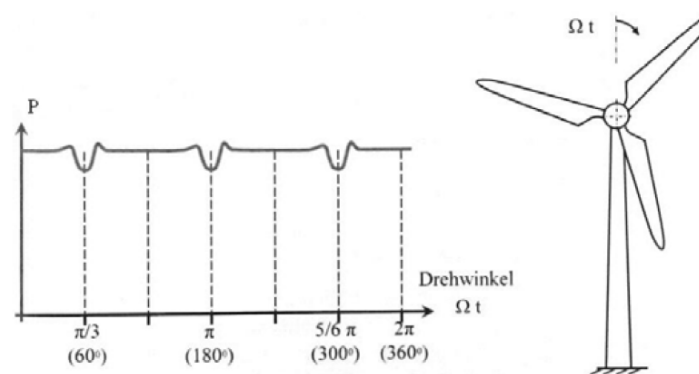
mit:

F_{BP} = Anregungskraft des Rotors bei Annäherung an den Turm

ΔF_{Ni} = Lastanteil der Anregungskraft des Rotors in der $i \times 3P$ Anregungsfrequenz

f_p = Frequenz der 3P Anregung

φ_i = Phasenwinkel der i -ten Harmonischen gegenüber der 3P Anregung



Quelle: Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, Jochen Twele, Robert Gasch



Step 4: Lastansatz für Anregungskraft des Rotors F_{BP}

F_{BP} kann max. 1/3 der Schubkraft F_N sein

F_{BP} Abhängig von:

- Turmdurchmesser
- Abstand Rotor zum Turm
- Turmvorstau und damit indirekt von der Windgeschwindigkeit
- Höhe des Lastangriffspunktes
- Maß der aerodynamischen Dämpfung
- ...

➔ **Nächste Schritte: Ermittlung F_{BP}**
Lastansatz für Fundamentkraft

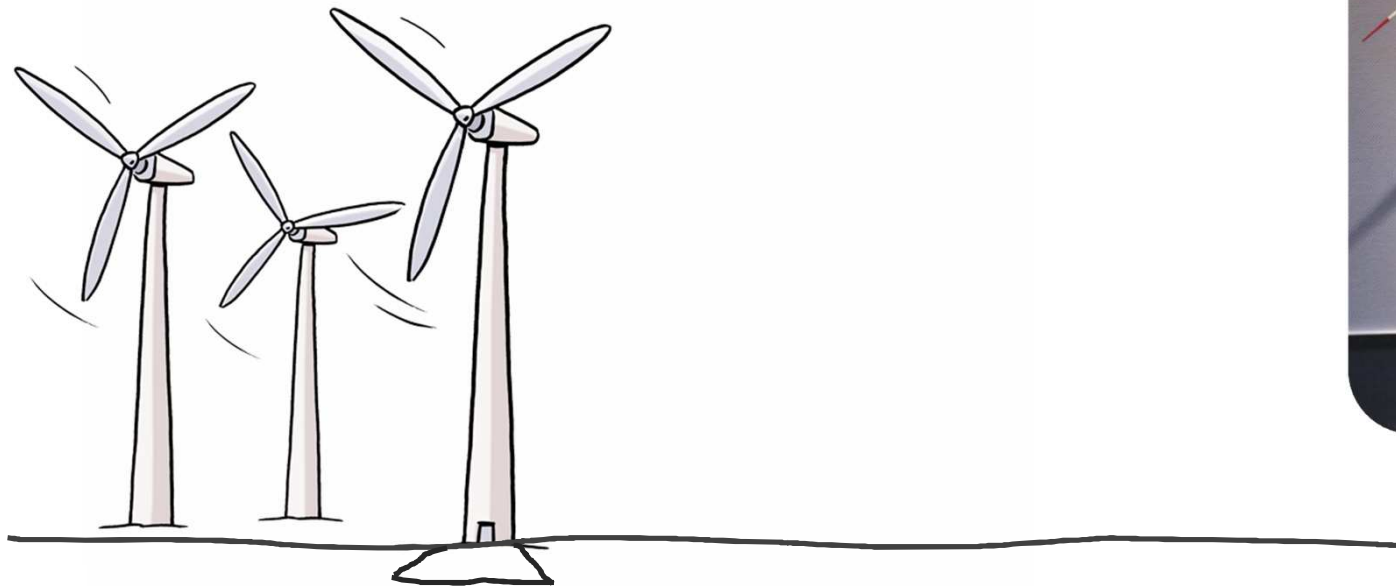


AP 3.1

Minderungsmaßnahmen der Emissionen an der Quelle (WEA)

Möglichkeiten

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



1:100 Modell



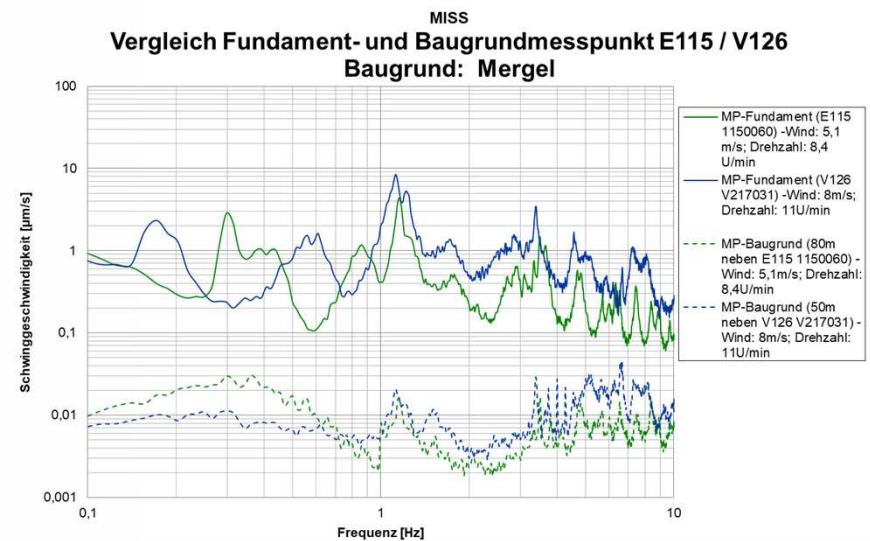
Zusätzliche messtechnische und rechnerische Untersuchungen

Messtechnische Untersuchung der Fundamentbewegungen an einem offenen Fundament

Messtechnische Untersuchung der Amplitudenabnahme Fundament zu Baugrund

- insbesondere im Frequenzbereich $f < 2\text{Hz}$
- Fundamentnahe Messungen

Aufstellen einer Abnahmebeziehung zum Ansatz in der Prognose und zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen am Fundament





Vielen Dank

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



Akkreditiertes Prüflabor gemäß
DIN EN ISO/IEC 17025
im Bereich Erschütterungen,
Modul Immissionsschutz.