

Prognose der Fundamentbewegung & Maßnahmen zur Minderung der Emissionen an der Quelle

MISS-Abschlusskonferenz

20.05.2021

Dr.-Ing. Michael Mistler

Dipl.-Ing. Philipp Meckbach



AP 1.1

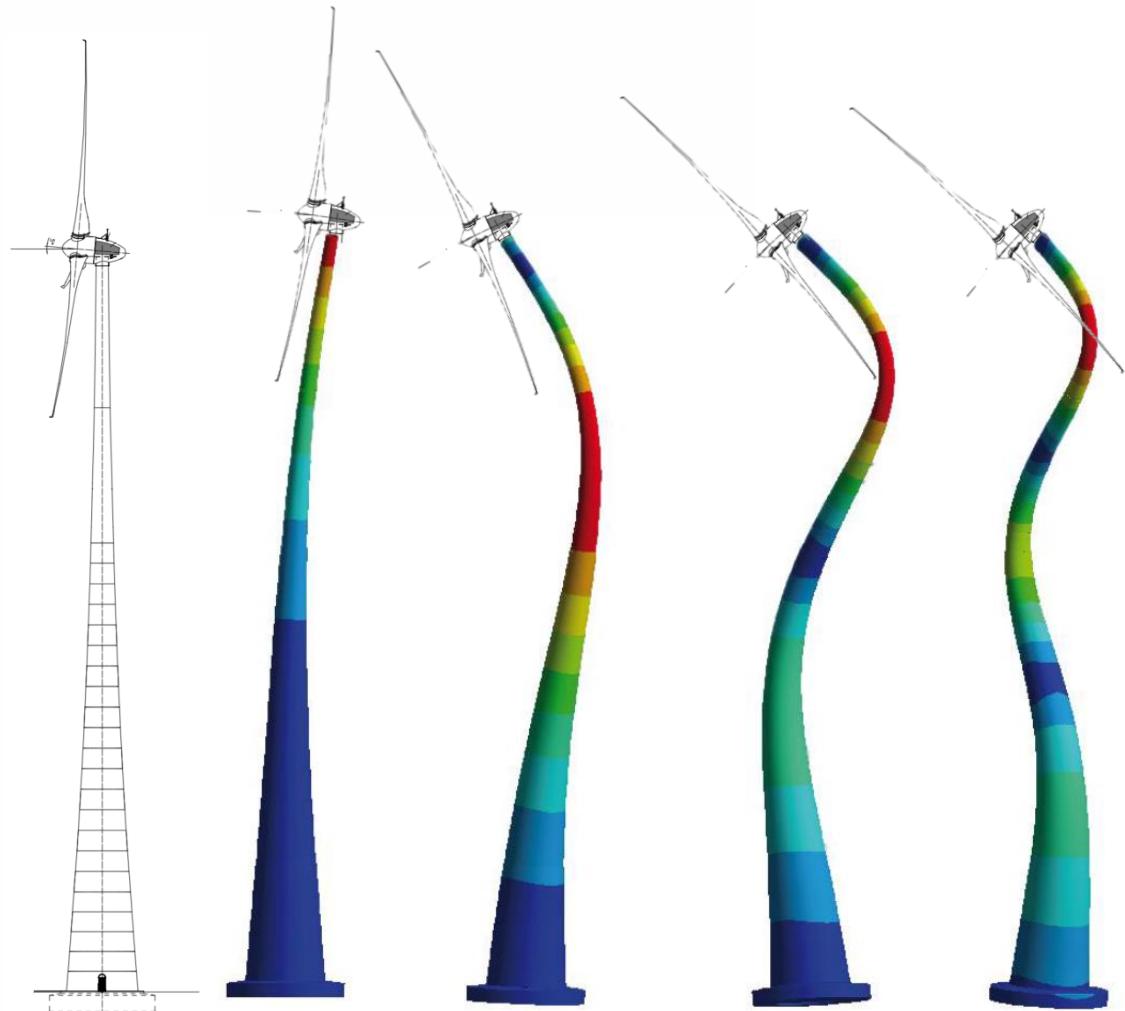
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemision

AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

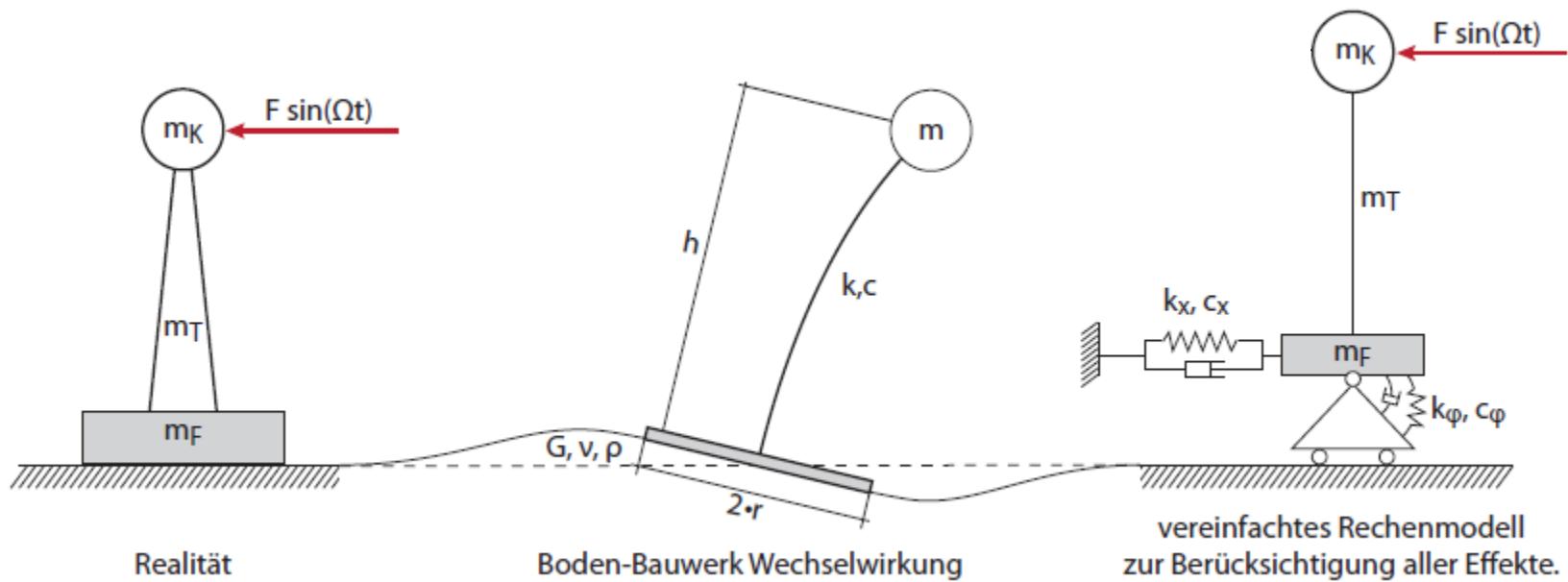
AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle



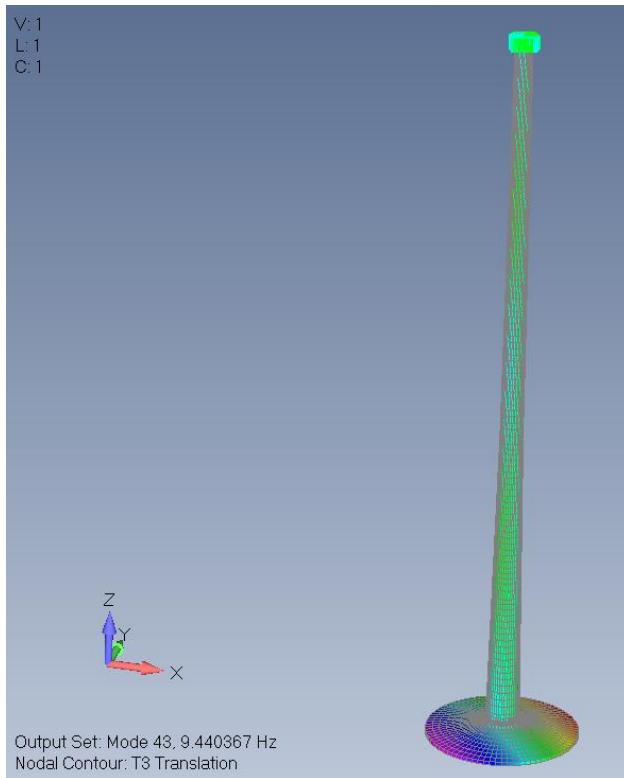
Prognoseansatz

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

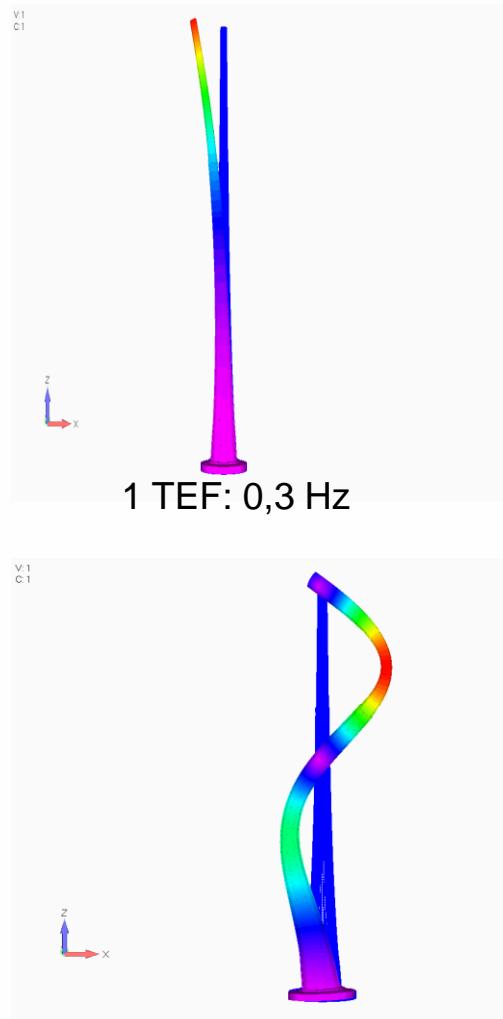


Quelle: Heiland T.: Untersuchung zur Erschütterungsemision von Windenergieanlagen

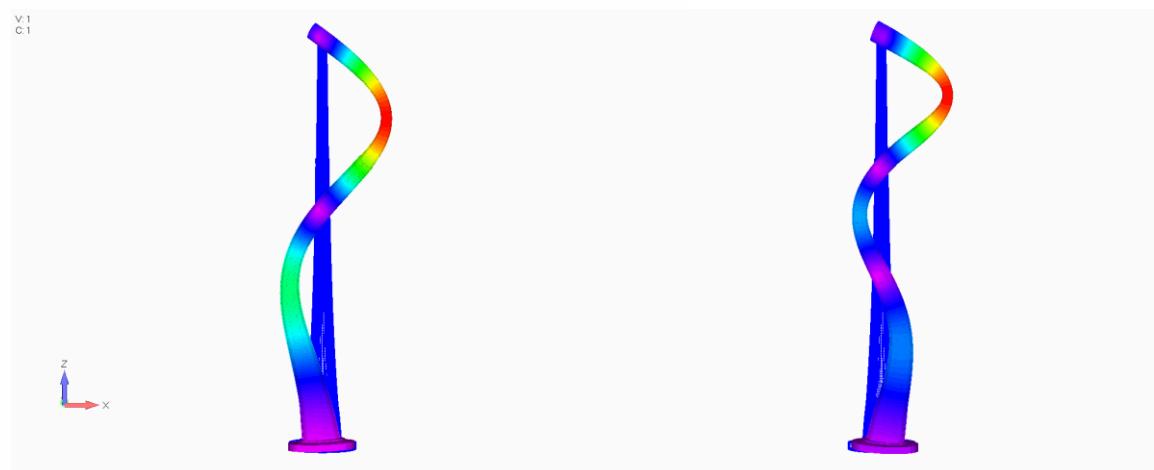
Step 1: Erstellung FE-Modell



TEF : Turmeigenfrequenz

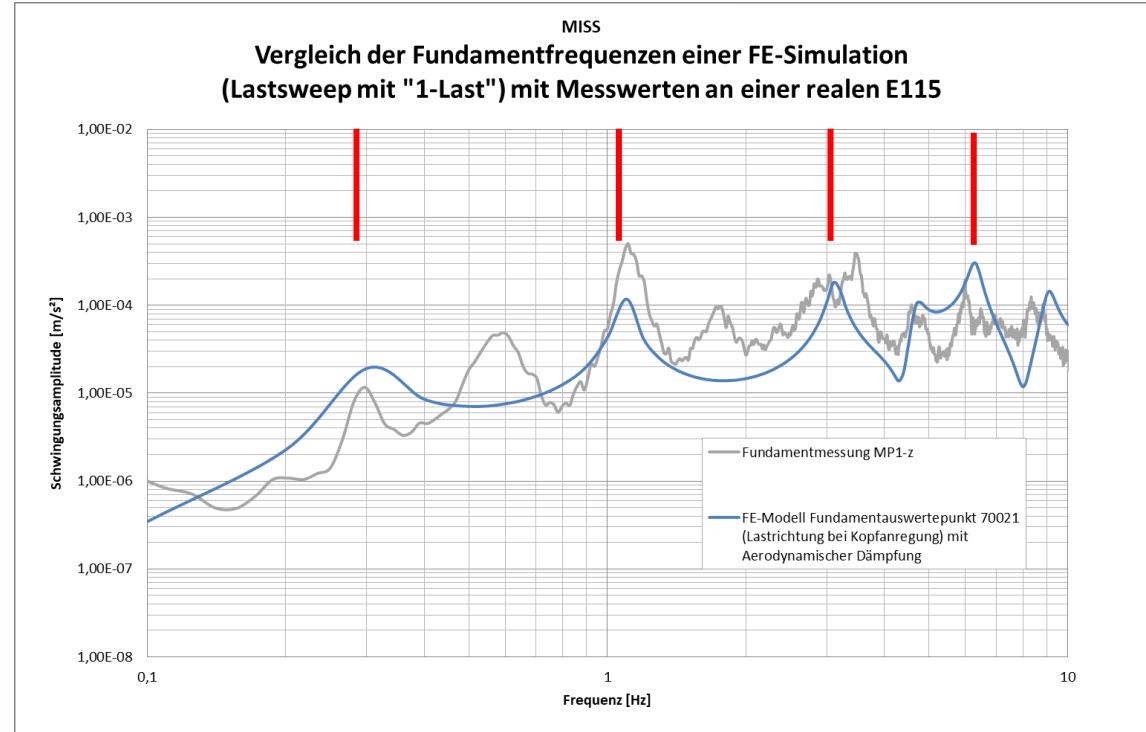
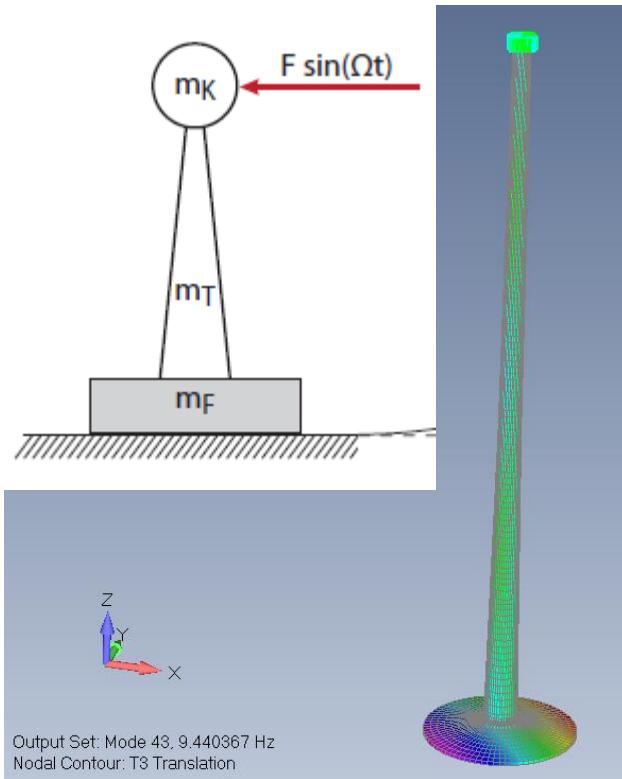


3 TEF: 3,2 / 3,5Hz



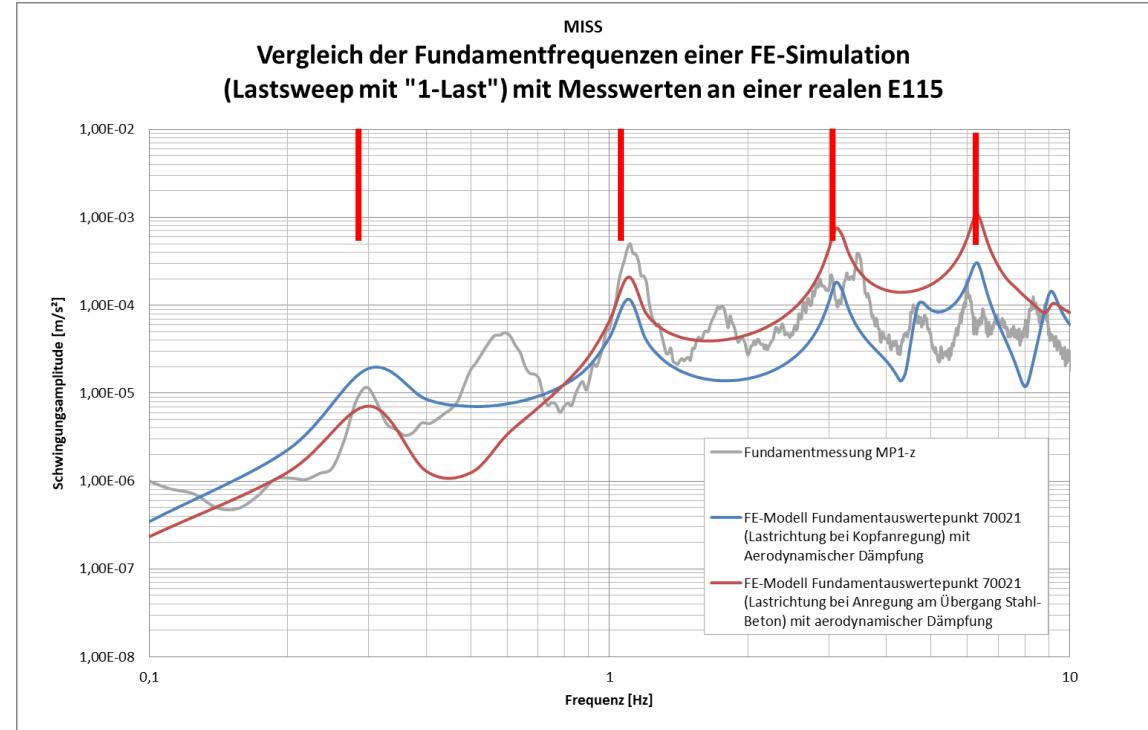
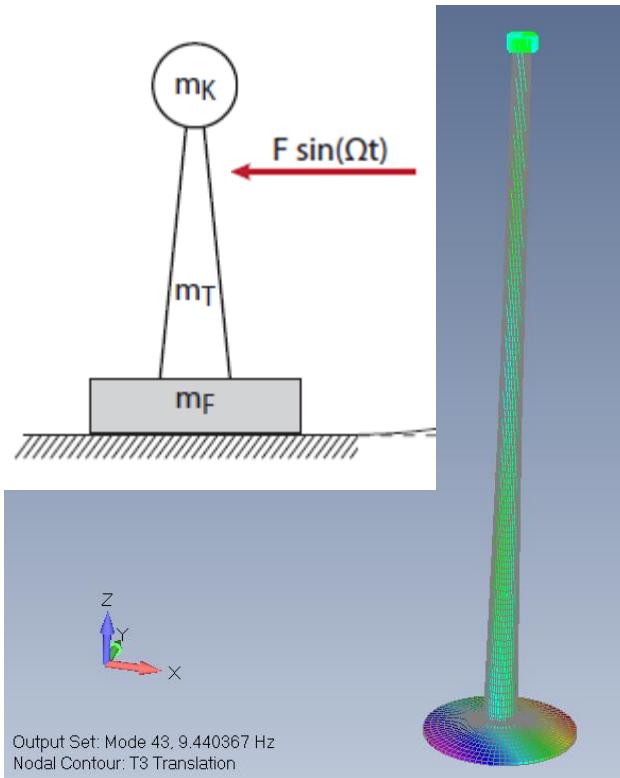
3 TEF: 6,0 / 7,0Hz

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.

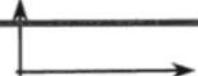
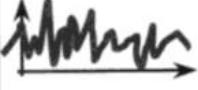
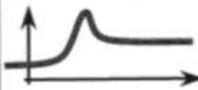
Step 2: Sweep mit einer harmonischen „1-Last“ am Kopfende des Turms



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

Step 3: Lastansatz

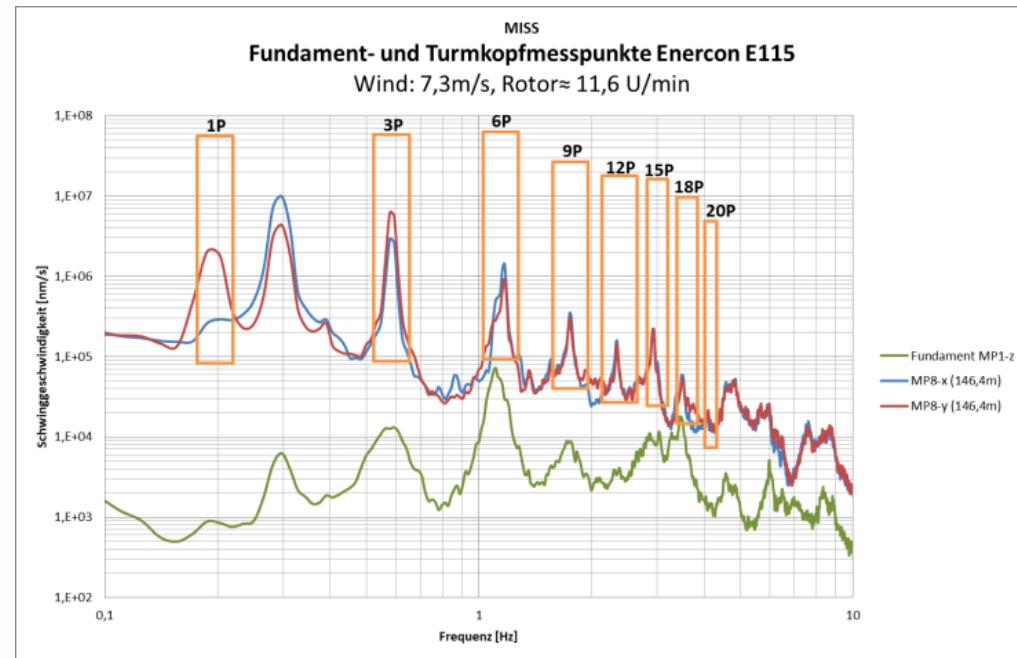
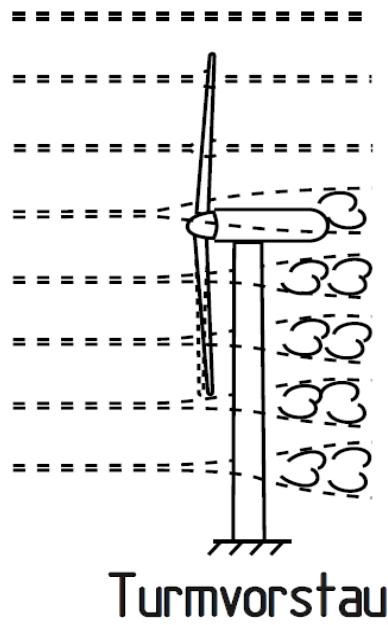
Welche Kräfte wirken auf eine WEA?

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	Manover, Störungen, Extrembedingun- gen

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

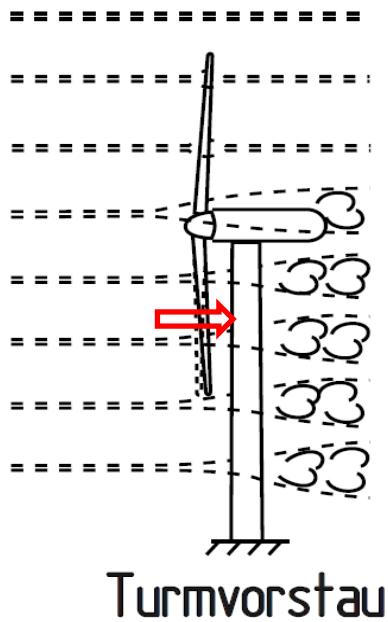
Step 3: Lastansatz

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



Step 3: Lastansatz

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

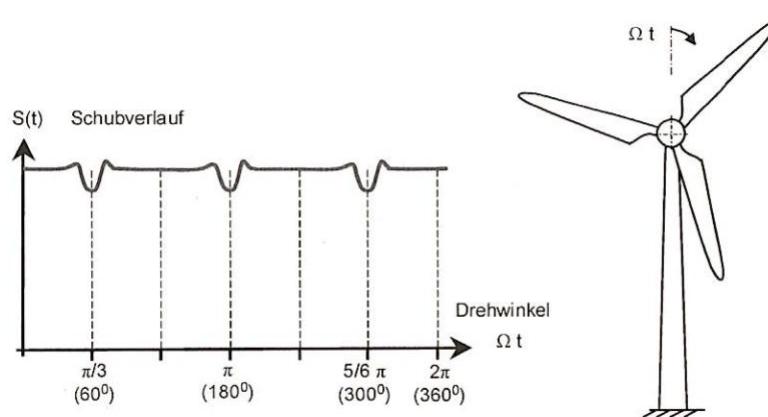
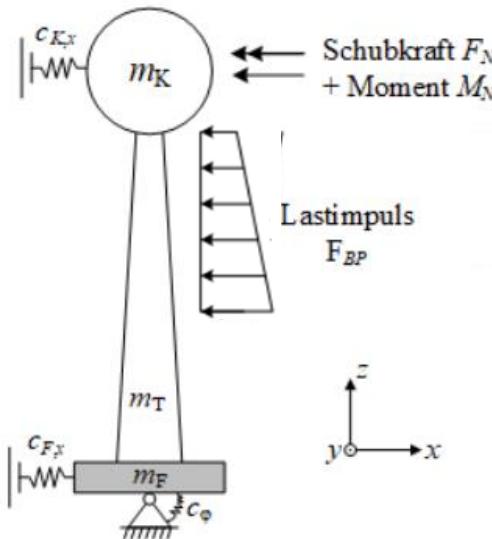


Turmvorstau

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.

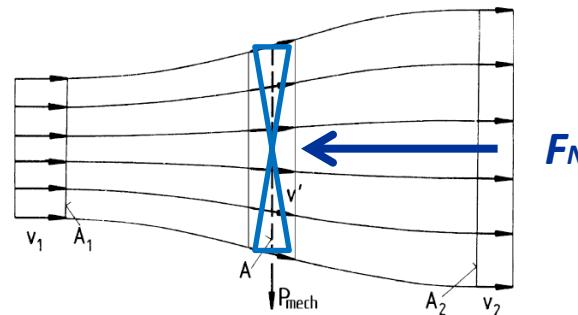
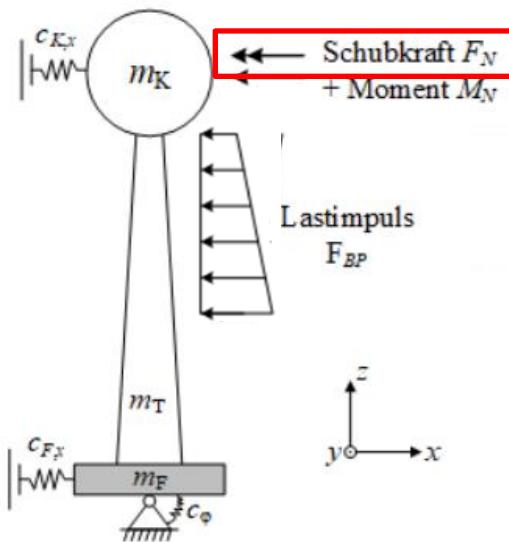
Step 3: Lastansatz

Das führt zu folgendem Prognosemodell mit umlaufperiodischem Lastimpuls



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

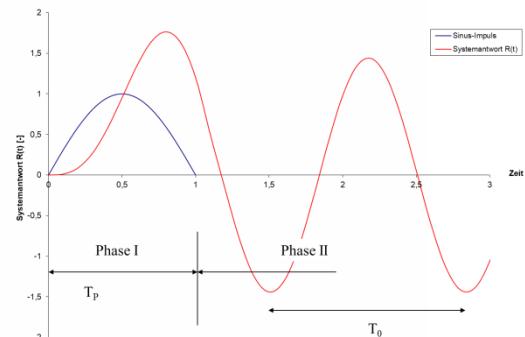
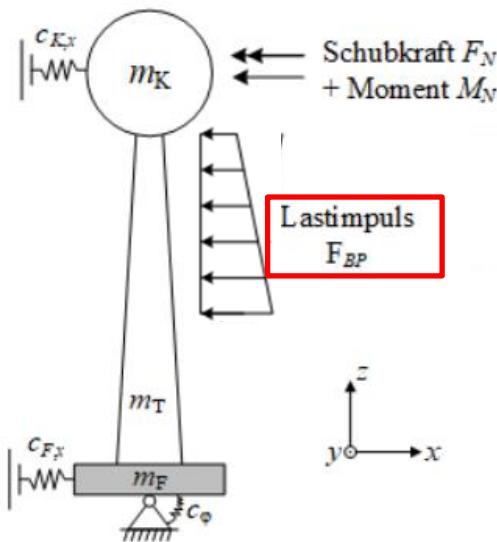
Step 3: Lastansatz für Schubkraft F_N



$$F_N = P_{WEA}^{\frac{2}{3}} \cdot (A_{Rotor} \cdot \rho_{Luft})^{\frac{1}{3}}$$

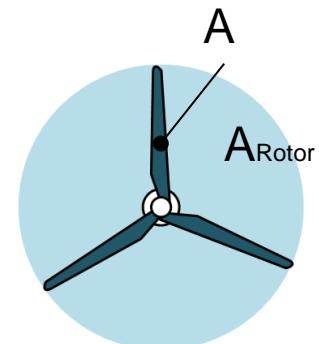
$$F_N = A_{Rotor} \cdot \frac{4}{9} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_1^2$$

Step 3: Lastansatz für Lastimpuls F_{BP}



$$F_{BP} \sim F_N \cdot \varphi \cdot \frac{1}{3}$$

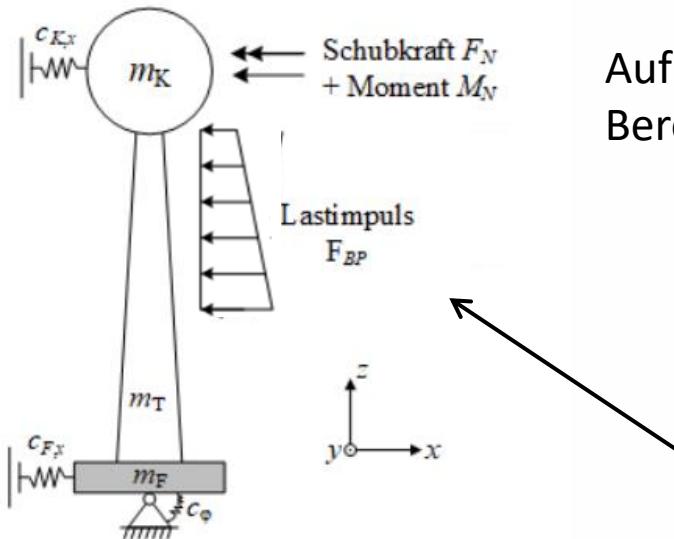
$$\varphi = \frac{A}{A_{Rotor}}$$



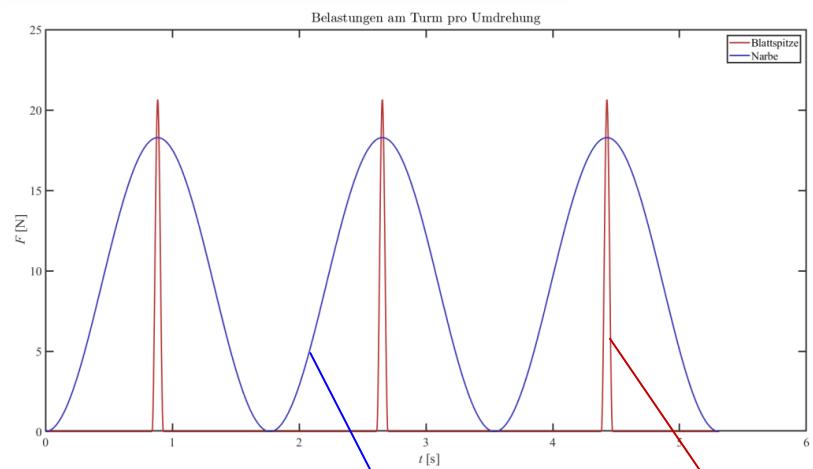
A = Summe der projizierten Flügelfläche
 A_{Rotor} = Überstrichene Rotorfläche

Step 4: Erstellung eines Prognosetools

Stabwerksprogramm auf MATLAB Basis - Lastansatz



Aufbringen eines Lastimpulses auf den Turm im Bereich der Flügelpassage



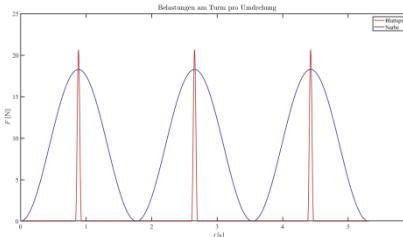
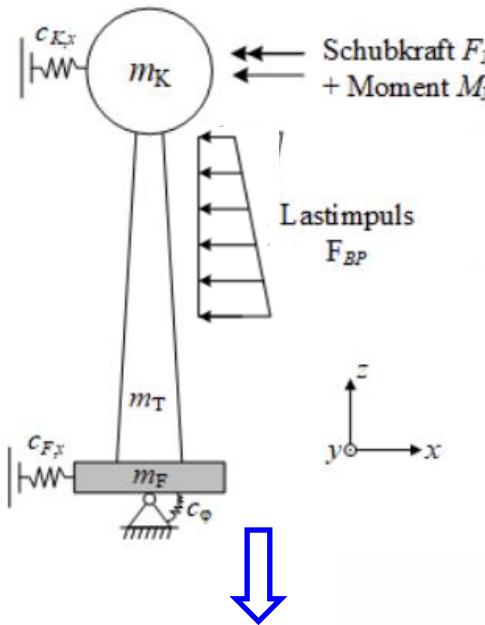
Verlauf der Lastimpulses abhängig von

- Höhe des Angriffspunktes
- Turmdurchmesser
- Rotationsgeschwindigkeit

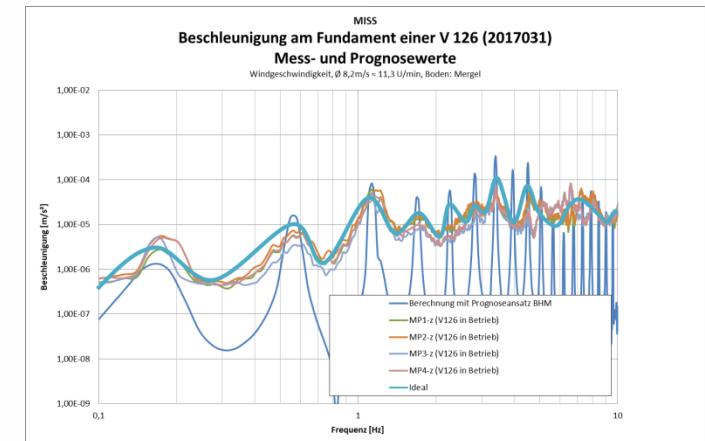
Nabe

Blattspitze

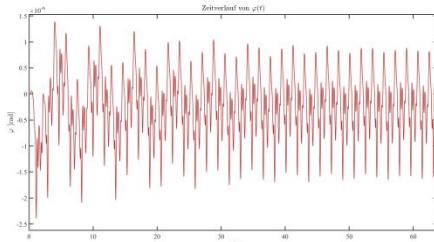
Stabwerksprogramm auf MATLAB Basis - Ausgabe



Spektrum am Fundament



Zeitverlauf der Fundamentdrehung



AP 1.1

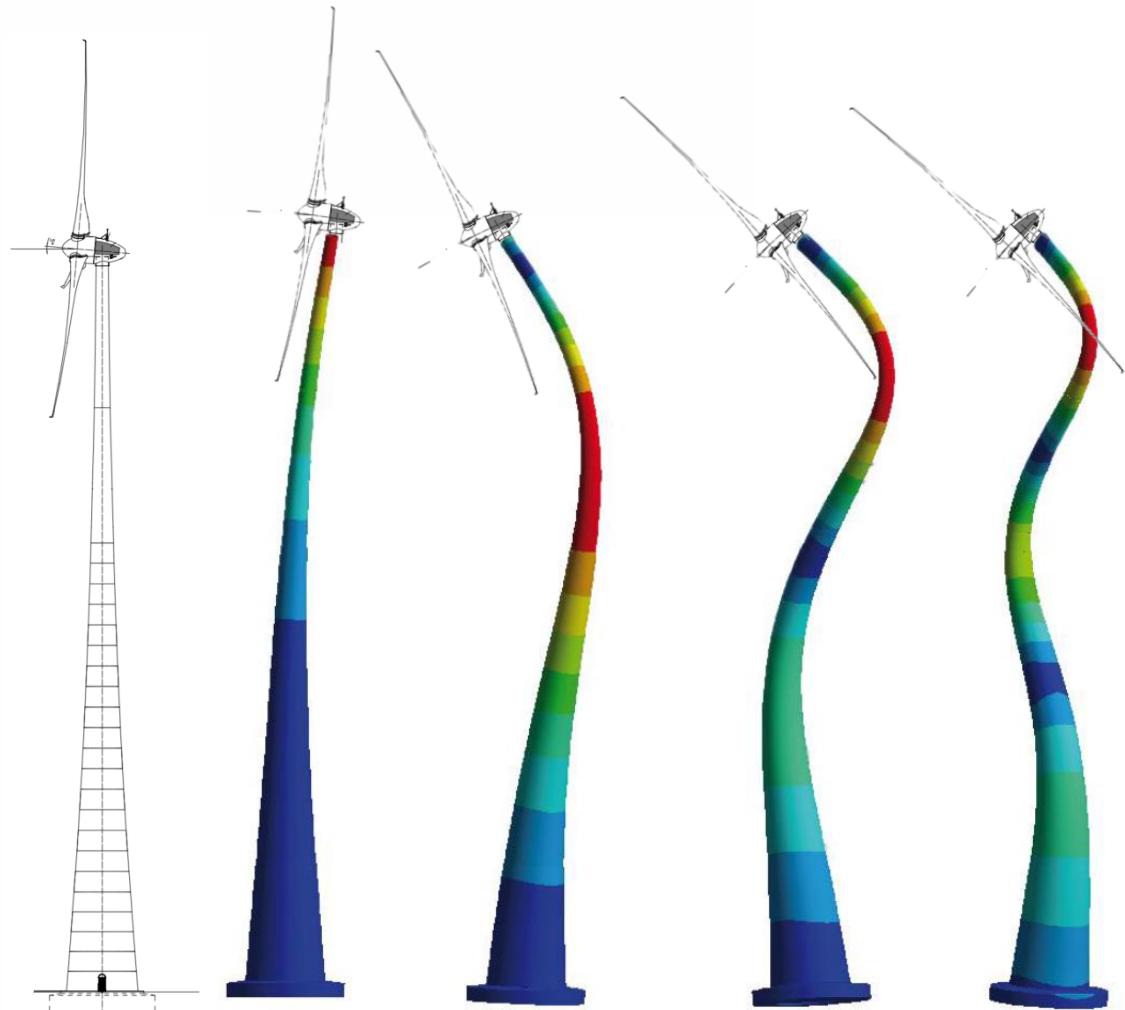
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemision

AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle

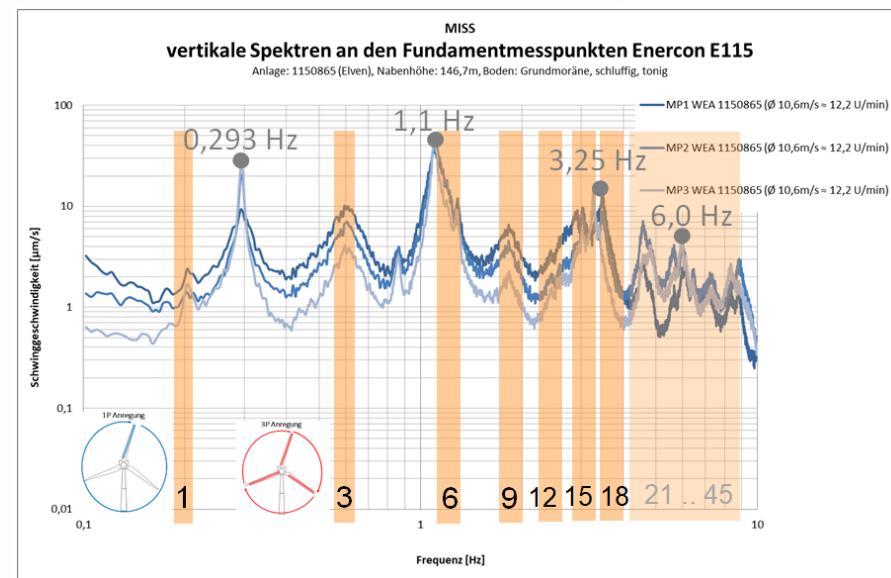


Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- Veränderung geometrischer Parameter
 - Veränderung an der Turmstruktur z.B. Anteil Stahl / Beton

Beeinflussung einzelner Turmeigenfrequenzen (Eigenmoden) und der modalen Dämpfung möglich.

Höhere Turmeigenfrequenzen ($f_{\text{Turm}} > 6P$ Anregung) werden jedoch immer durch Oberharmonische der 3P Anregung angeregt.



Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- Veränderung geometrischer Parameter
 - Veränderung der Fundamentierung (Erhöhung der Drehfedersteifigkeit)

Drehfedersteifigkeit eines Kreisfundamentes (Näherung nach Richart et all. 1971)

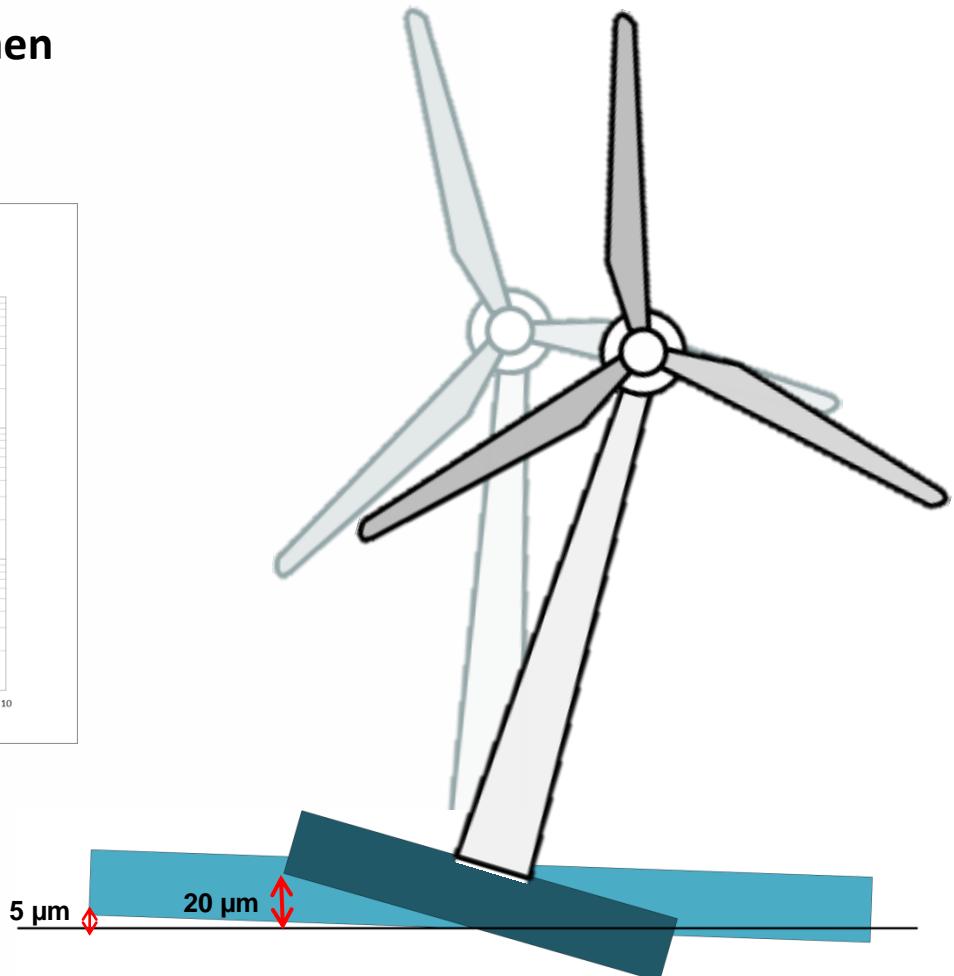
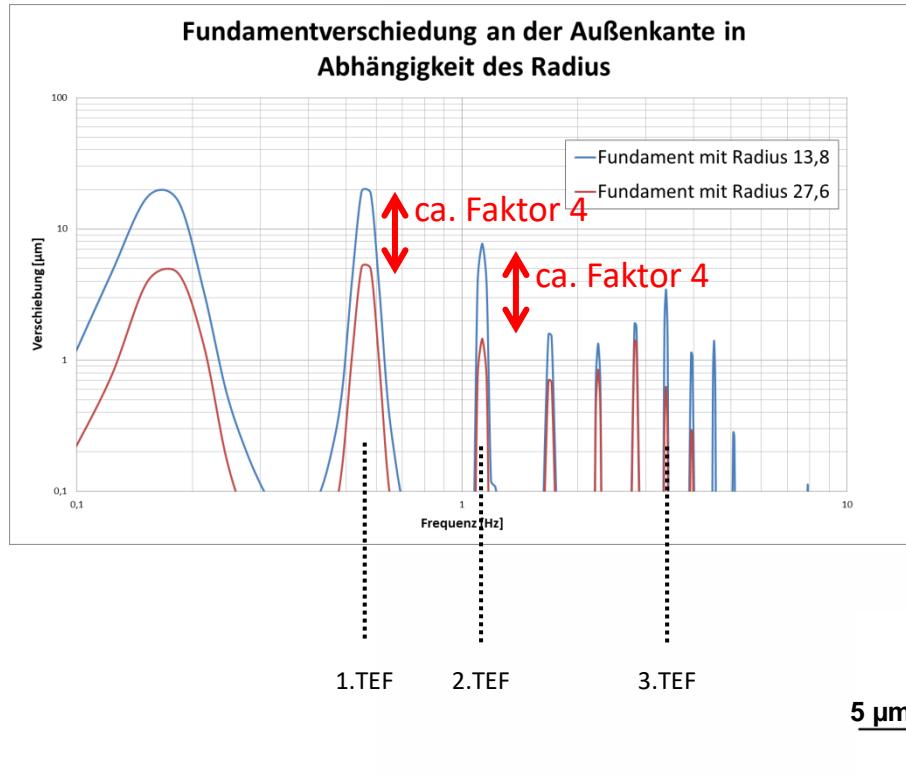
$$K_\varphi = \frac{8G_d r^3}{3(1 - \nu)}$$

Das bedeutet:

- Doppelter Fundamentradius \approx 8fache Fundamentsteifigkeit
- 8fache Fundamentsteifigkeit \approx 8fach geringere Fundamentverdrehung
(bei gleicher Krafteinwirkung)
- Doppelter Fundamentradius \approx doppelter Hebelarm
(Reduktion des Effektes um Faktor 2)
- **Doppelter Fundamentradius \approx 4 fach geringere Fundament-Randverschiebung**

Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- Veränderung der Fundamentierung

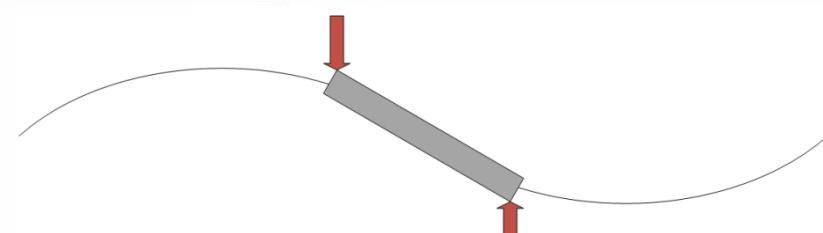
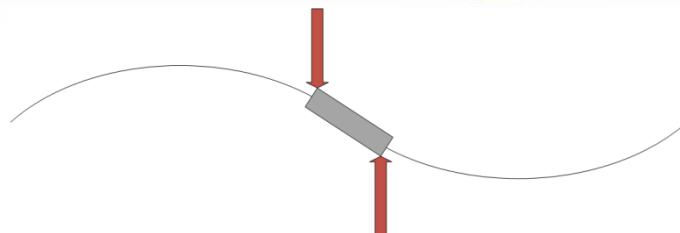
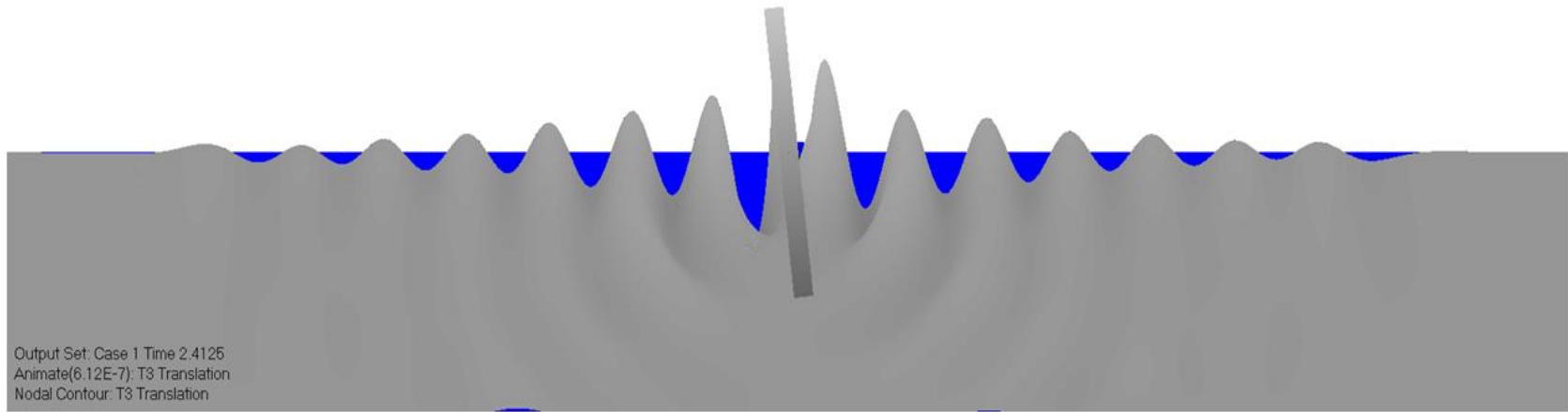
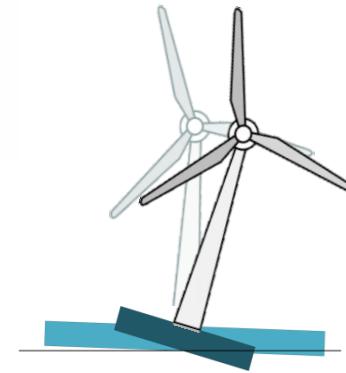


Auswirkung Fundamentradius im unmittelbaren Nahfeld nachweisbar

Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

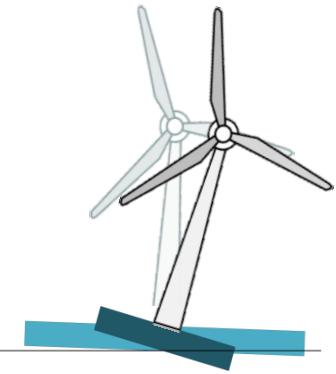
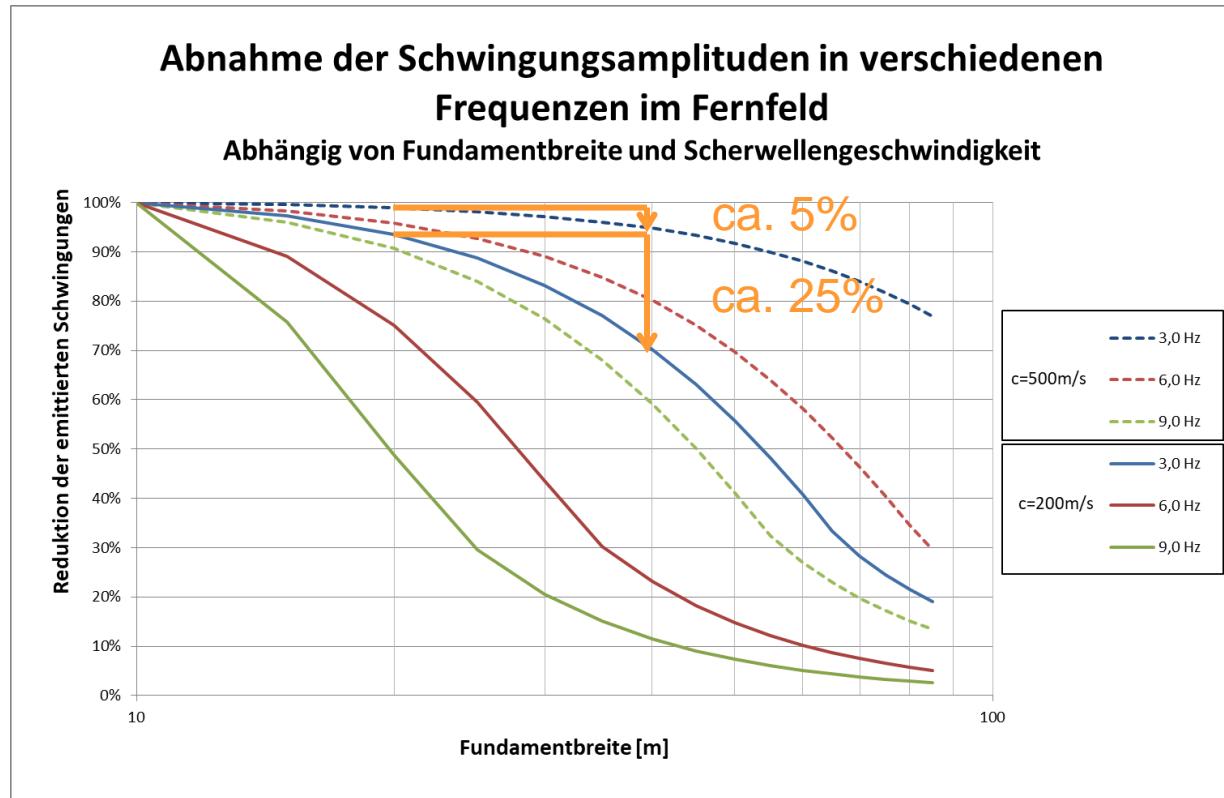
- Veränderung der Fundamentierung (Auswirkungen Fernfeld)

V: 1
L: 10
C: 1



Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- Veränderung der Fundamentierung (Auswirkungen Fernfeld)

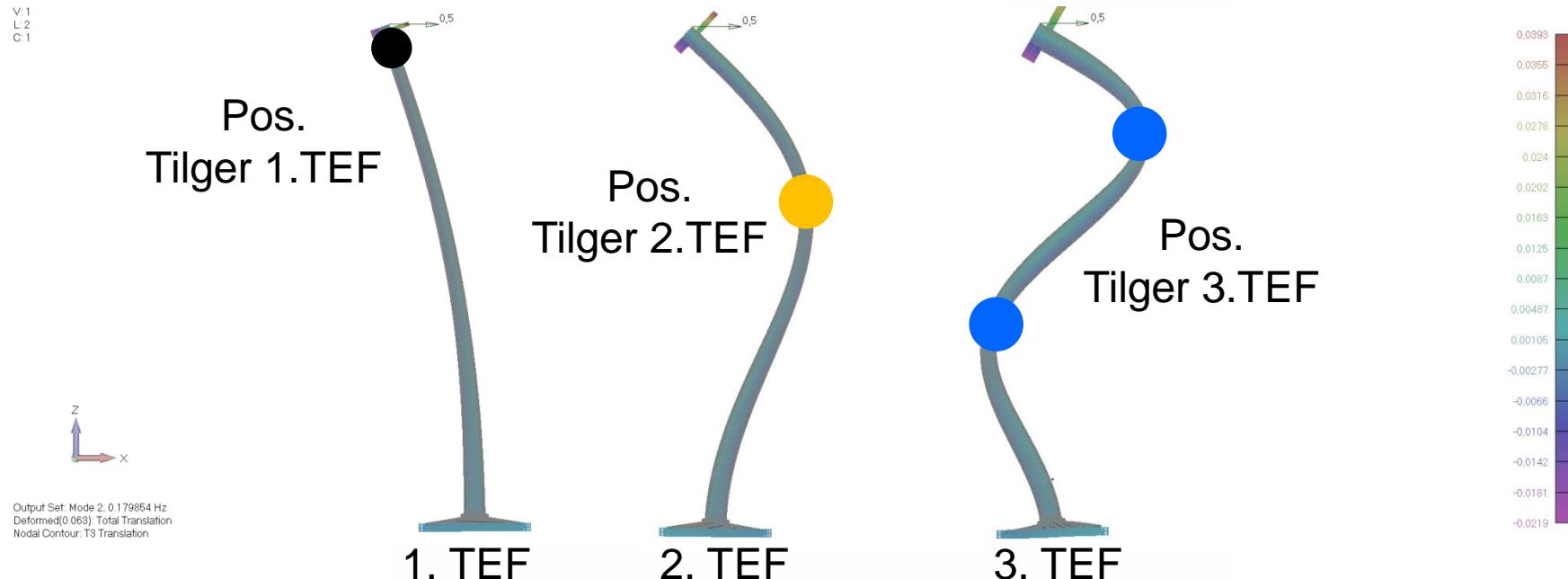


Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

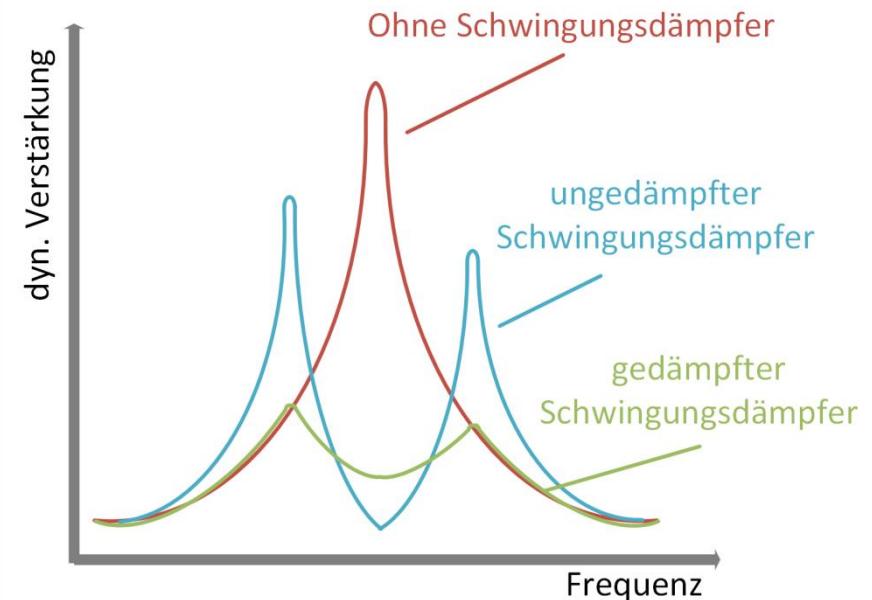
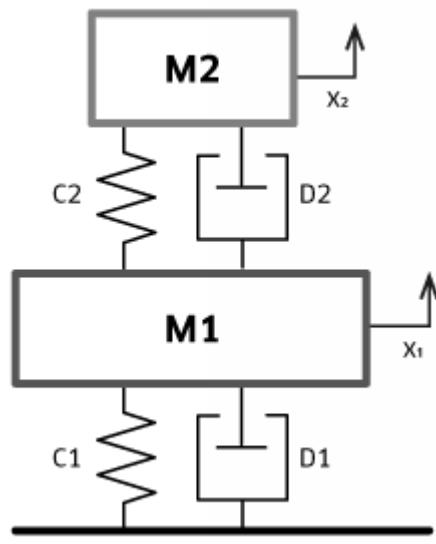
- Einsatz von Dämpfern (Schwingungstilger)

Für die Dämpfung der 1. Eigenfrequenz ist ein Dämpfer bei weich abgestimmten Anlagen bereits (optionaler) Standard.

Es müssen aber insbesondere die Schwingungen in der 2., 3. und 4. Eigenfrequenz gedämpft werden.

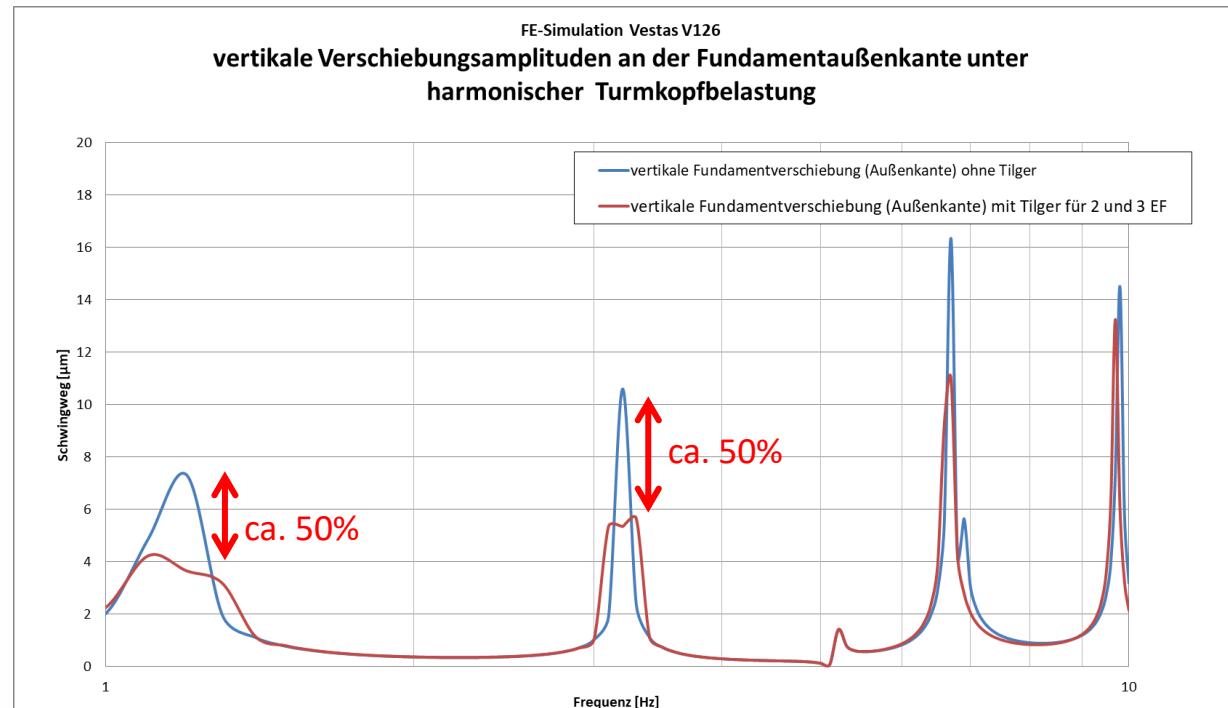
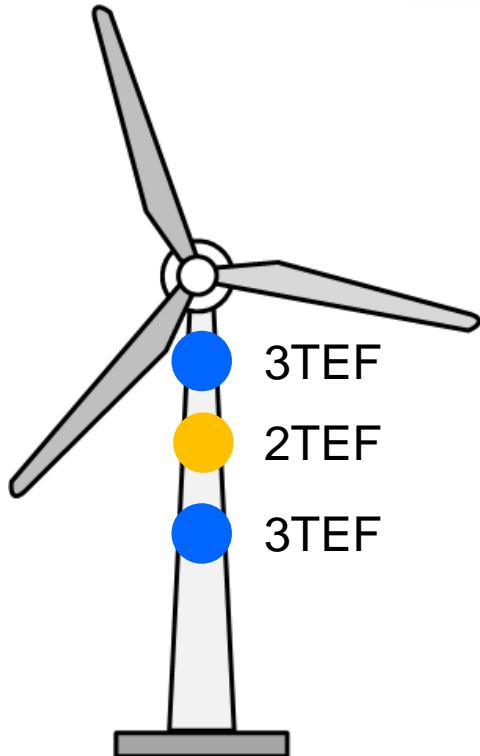


Exkurs - Schwingungsdämpfer



Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- Einsatz von Dämpfern an einem Stahlurm (Vestas V126)



Bez.	Turmeigenfrequenz [Hz]	Tilgermasse [t]	Dämpfung [kNs/m]
2.TEF	1,16 / 1,22 Hz	4	9,04
3.TEF	3,24 / 3,6 Hz	0,6	4,11

Zusammenfassung

- Mit den gezeigten Lastansätzen ist eine vereinfachte Berechnung der Fundamentverschiebung infolge umlaufperiodischer dynamischer Anregung möglich.
- Minderungsmaßnahmen an der Quelle sind möglich, haben aber auch ihre Grenzen:
 - Mit Änderungen der Turmstruktur, kann maßgeblich das Schwingungsniveau in der 2.TEF bzw. die Dämpfung einzelner TEF beeinflusst werden.
 - Änderungen an den Fundamentabmessungen führen zu deutlichen Reduktionen der Schwingungsamplituden im Nahfeld. Im Fernfeld ist der Effekt frequenz- und baugrundabhängig jedoch geringer.
 - Der Einsatz von Schwingungsdämpfern ist zur Bedämpfung der ersten 3-4 Turmeigenfrequenzen möglich. Die Reduktionsfaktoren sind stark systemabhängig. Hier ist Potential für weitere Entwicklungsarbeit.



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.