

# 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

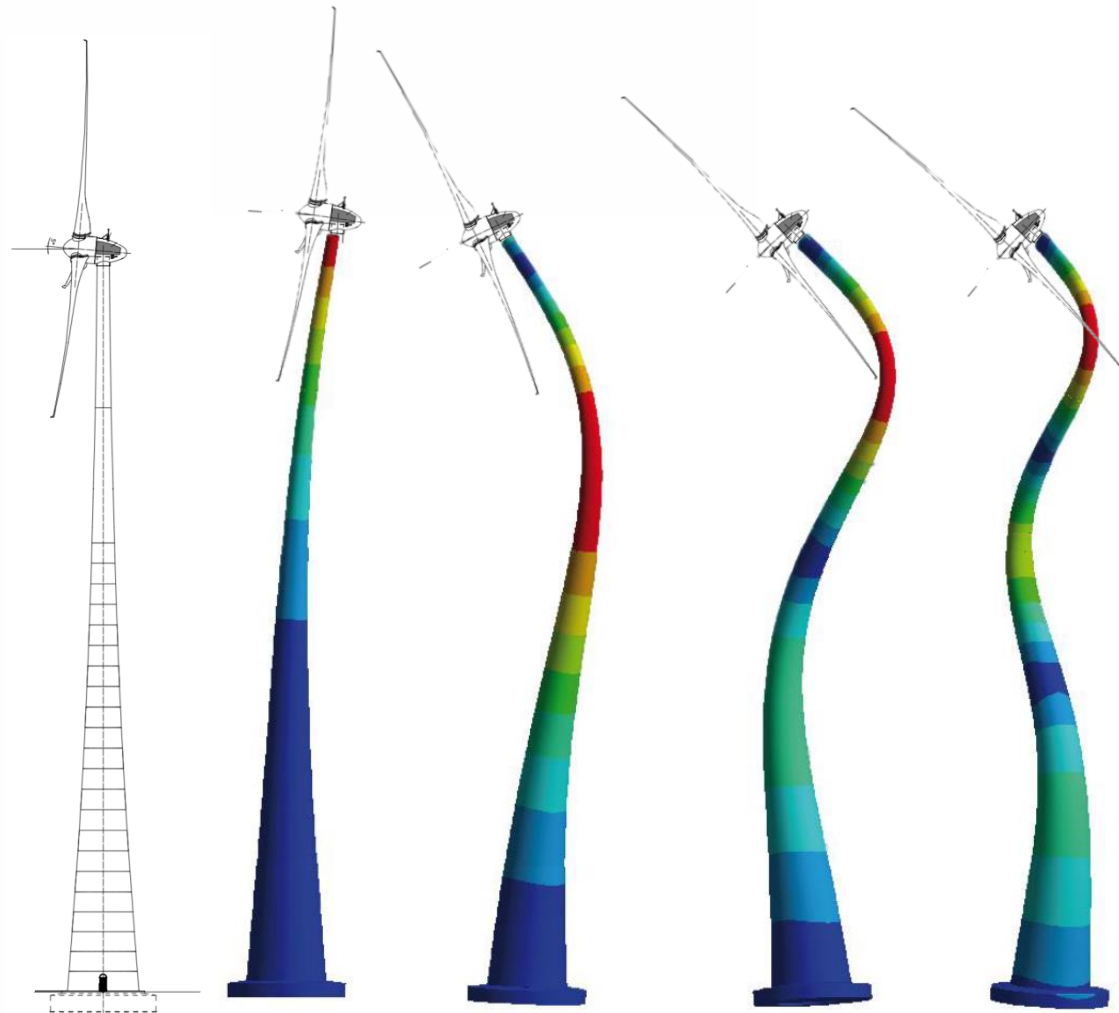
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

## AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

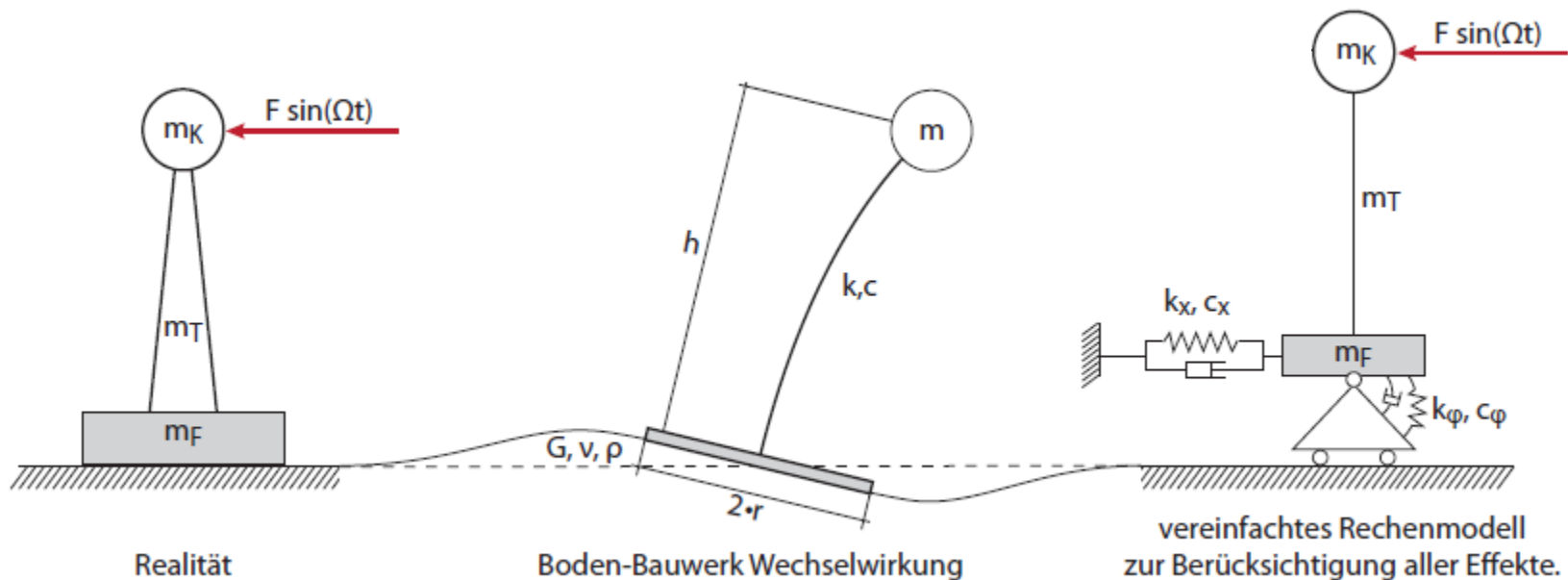
## AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle



## Prognoseansatz

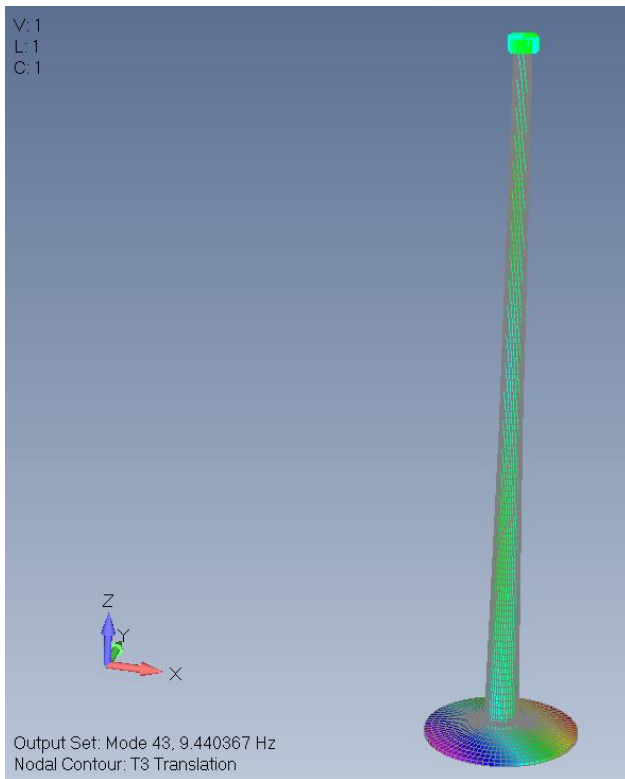
- Erstellung vereinfachtes FE-Modell (Kragarm mit Kopfmasse)
- Aufbringen einer Last am Turmkopf
- Berechnung der Fundamentbewegung infolge der Last



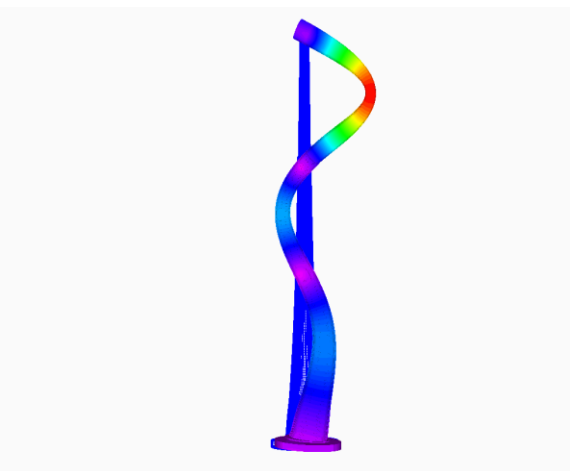
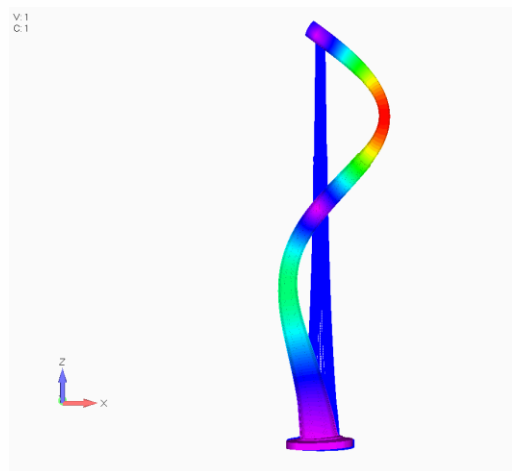
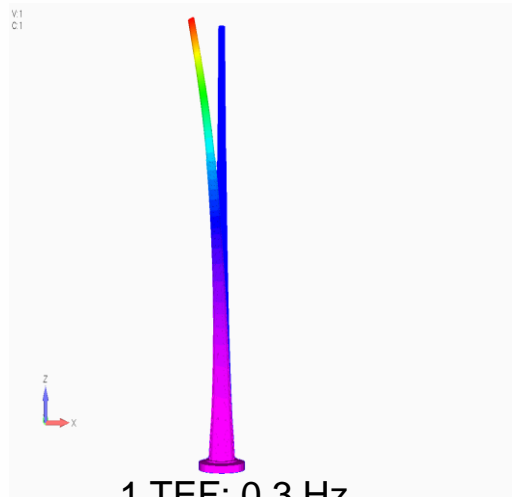
Quelle: Heiland T.: Untersuchung zur Erschütterungsemission von Windenergieanlagen



## Step 1: Erstellung FE-Modell



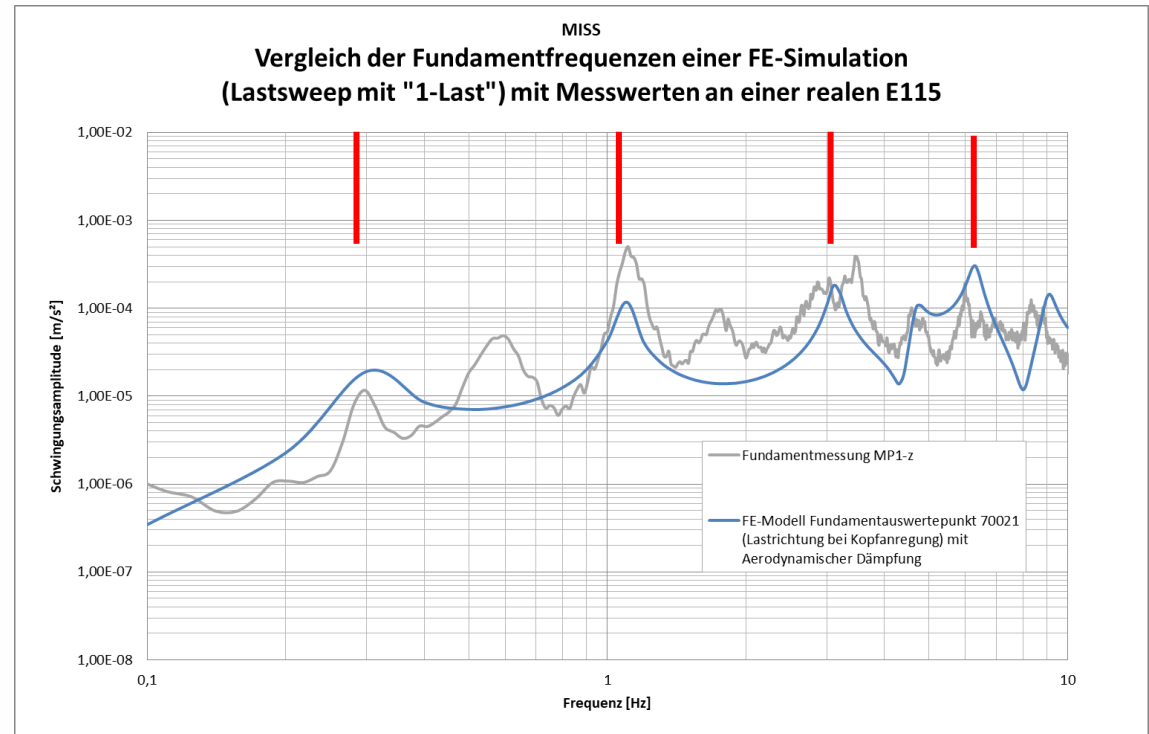
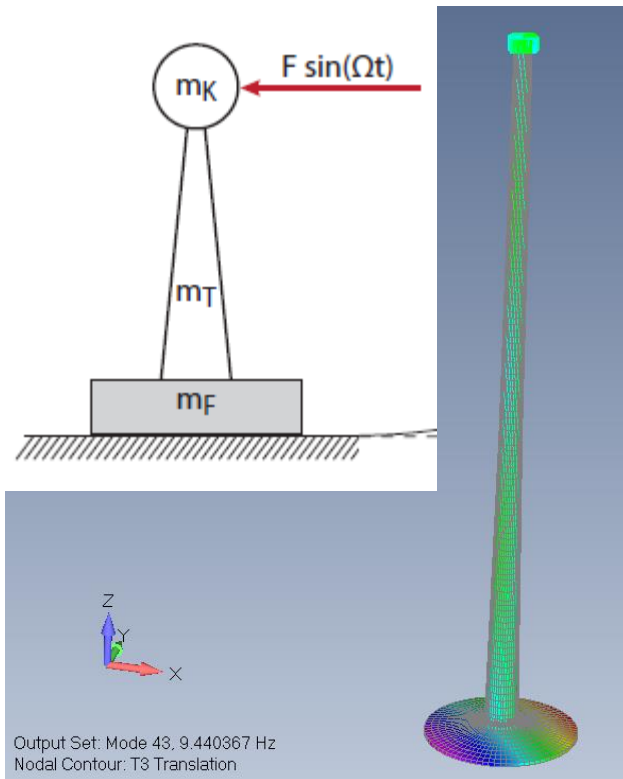
TEF : Turmeigenfrequenz



3 TEF: 3,2 / 3,5Hz

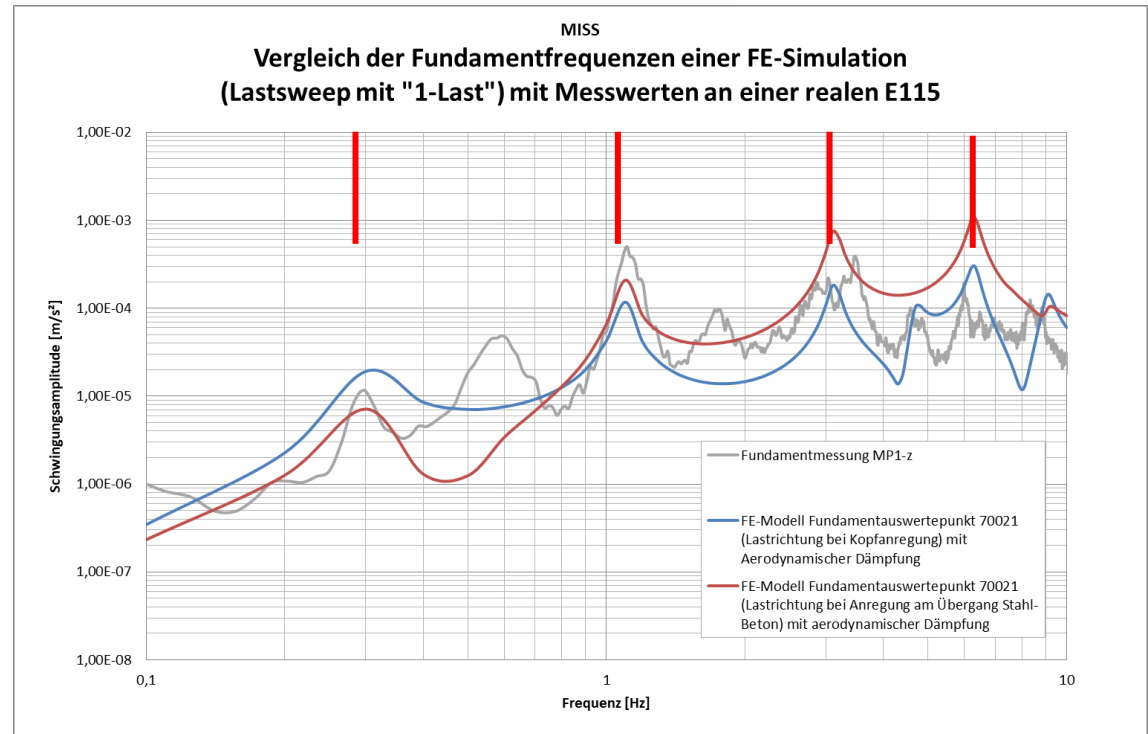
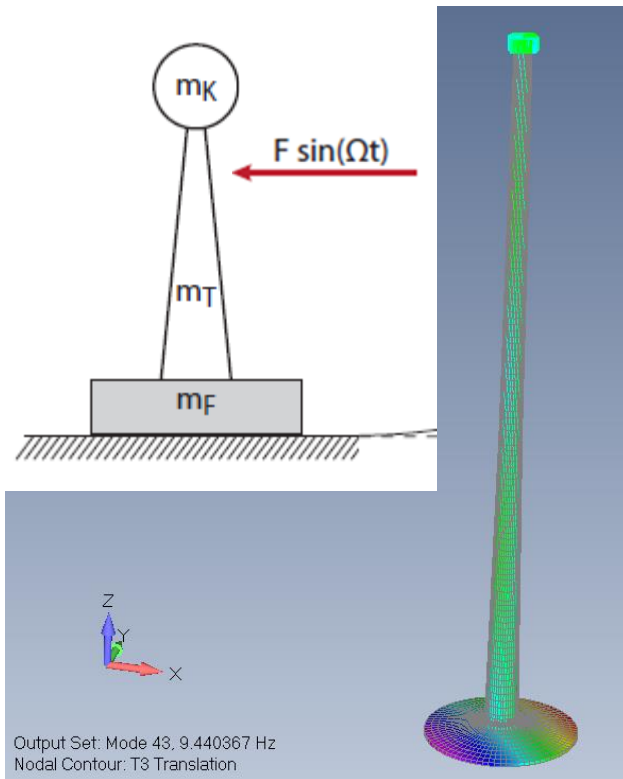
3 TEF: 6,0 / 7,0Hz

### 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.




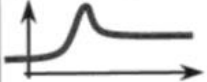
### Step 2: Sweep mit einer harmonischen „1-Last“ am Kopfende des Turms



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

## Step 3: Lastansatz

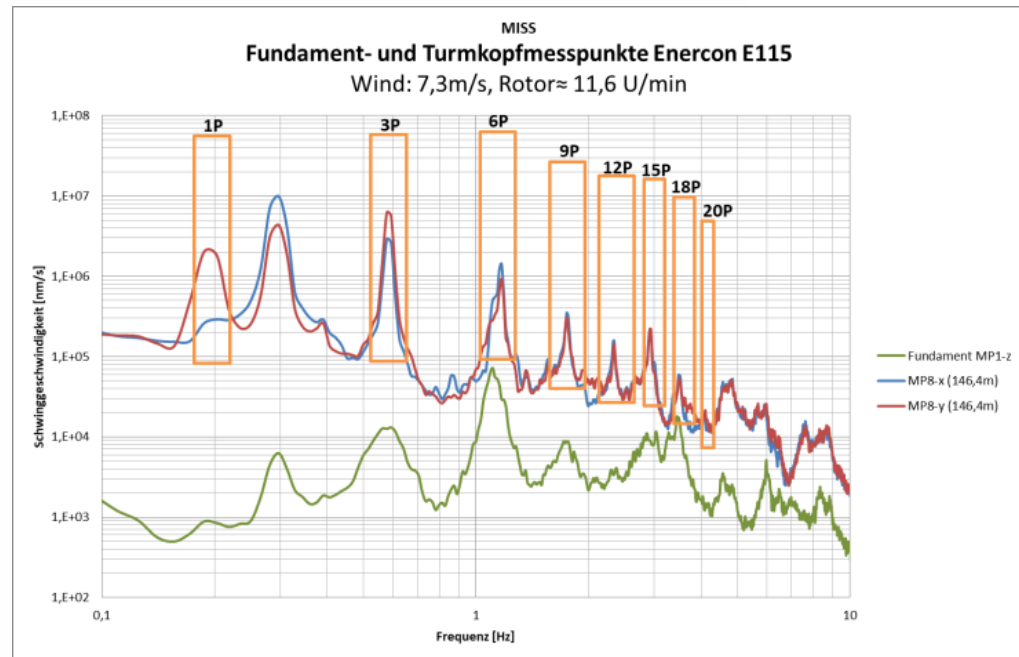
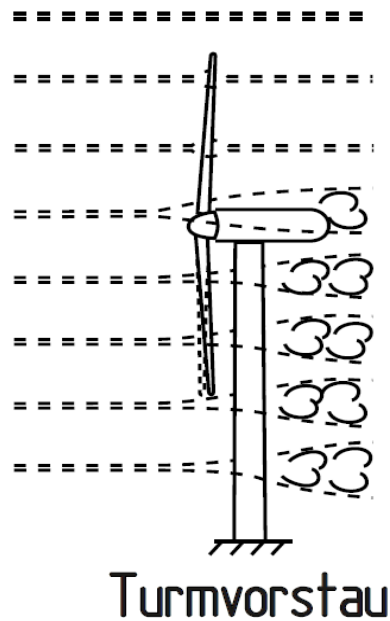
Welche Kräfte wirken auf eine WEA?

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, Extrembedingungen

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

### Step 3: Lastansatz

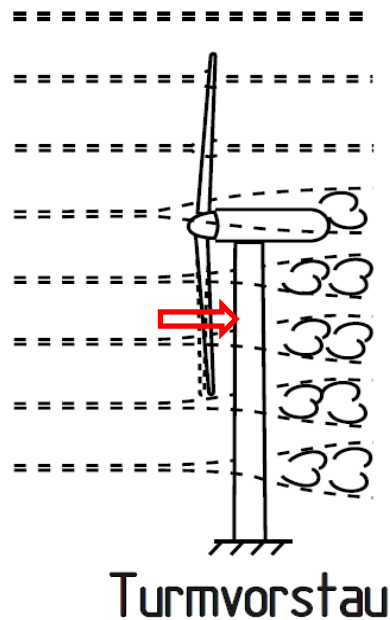
Neben Wirbelablösung kommt es durch den Turmvorstau und durch den kurzzeitigen Einbruch der aerodynamischen Kräfte am Blatt, wenn dieses am Turm entlang streicht zu einem Belastungsimpuls. Dies führt zu einer Anregung in den 1P, 3P, 6P, 9P ... Frequenzen, die auch bei hohen Ordnungszahlen die Struktur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





## Step 3: Lastansatz

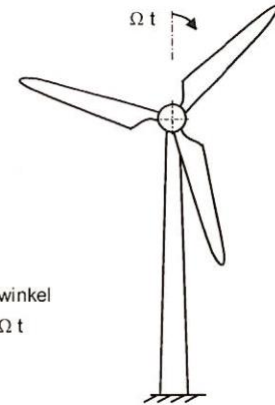
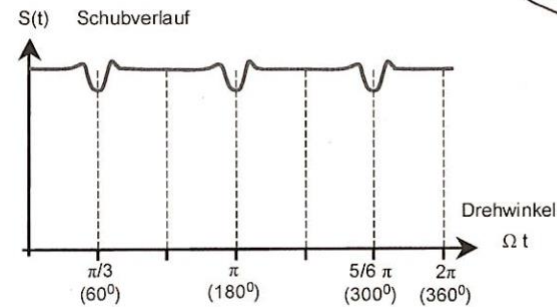
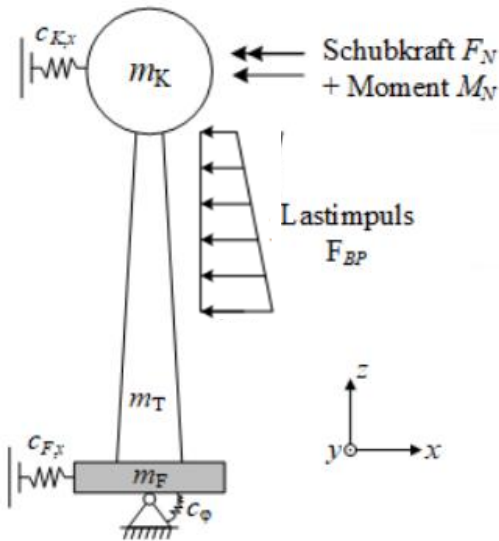
Neben Wirbelablösung kommt es durch den Turmvorstau und durch den kurzzeitigen Einbruch der aerodynamischen Kräfte am Blatt, wenn dieses am Turm entlang streicht zu einem Belastungsimpuls. Dies führt zu einer Anregung in den 1P, 3P, 6P, 9P ... Frequenzen, die auch bei hohen Ordnungszahlen die Struktur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



**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.**

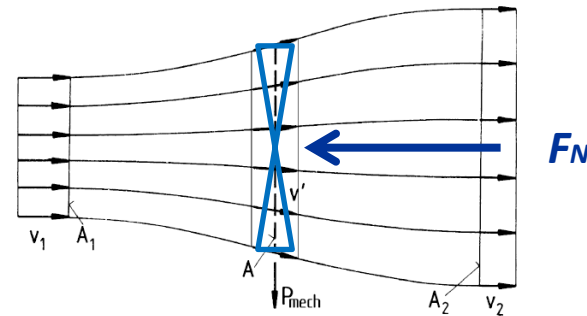
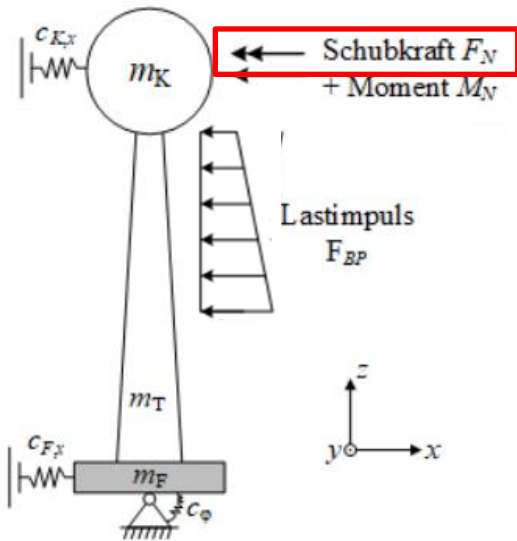
### Step 3: Lastansatz

Das führt zu folgendem Prognosemodell mit umlaufperiodischem Lastimpuls



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

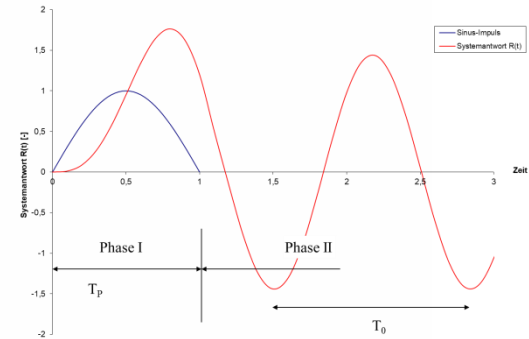
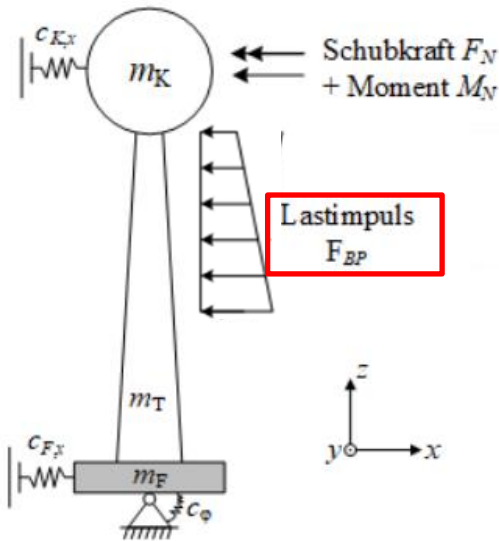
## Step 3: Lastansatz für Schubkraft $F_N$



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

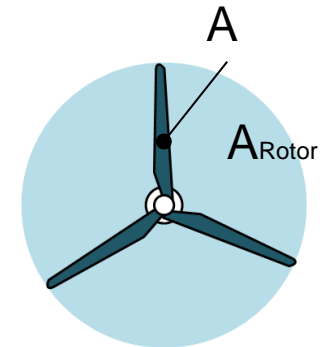
$$F_N = A_{Rotor} \cdot \frac{4}{9} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_1^2$$

### Step 3: Lastansatz für Lastimpuls $F_{BP}$



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

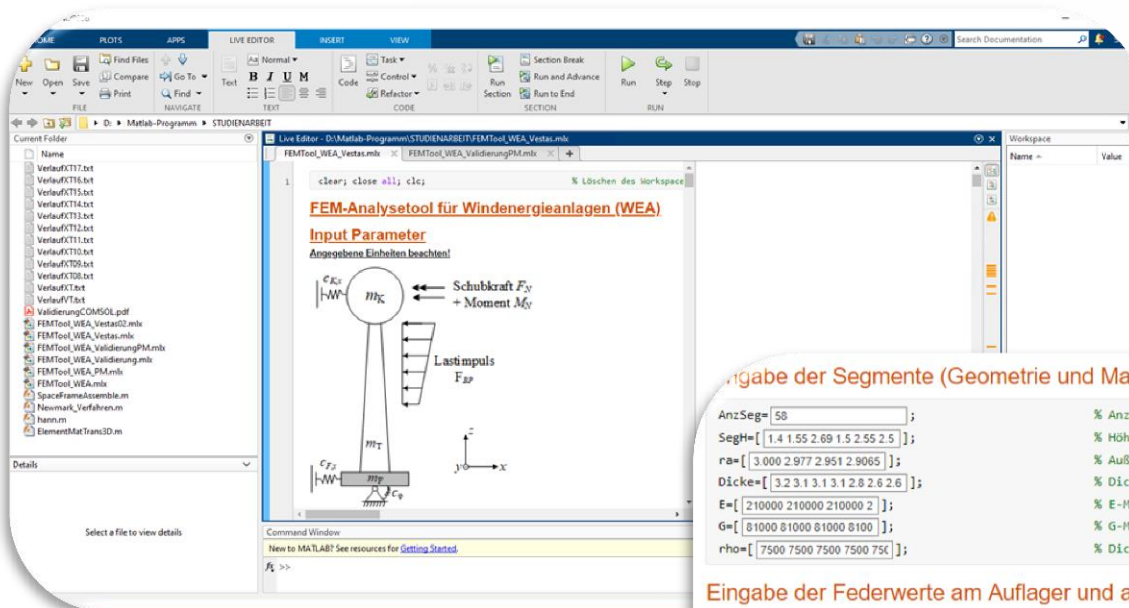
$$\varphi = \frac{A}{A_{Rotor}}$$



$A$  = Summe der projizierten Flügelfläche

$A_{Rotor}$  = Überstrichene Rotorfläche

## Step 4: Erstellung eines Prognosetools



### Eingabe der Segmente (Geometrie und Materialeigenschaften)

AnzSeg=58;	% Anzahl der Segmente	
SegH=[1.4 1.55 2.69 1.5 2.55 2.5];	% Höhen der Segmente.	Beginn: OK Fundament [m]
ra=[3.000 2.977 2.951 2.9065];	% Außenradien der Segmente.	Beginn: OK Fundament [m]. Syntax : [Anfangsradius  Endradius  Anf
Dicke=[3.2 3.1 3.1 3.1 2.8 2.6 2.6];	% Dicken der Segmente.	Beginn: OK Fundament [cm]
E=[210000 210000 210000 2];	% E-Moduln der Segmente.	Beginn: OK Fundament [MPa, MN/m <sup>2</sup> ]
G=[81000 81000 81000 8100];	% G-Moduln der Segmente.	Beginn: OK Fundament [MPa, MN/m <sup>2</sup> ]
rho=[7500 7500 7500 7500 75k];	% Dichten der Segmente.	Beginn: OK Fundament [kg/m <sup>3</sup> ]

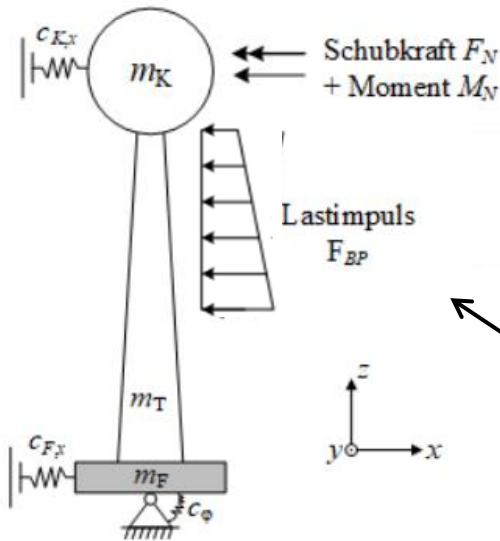
### Eingabe der Federwerte am Auflager und am Turmkopf

cX_Auflager=10000000000000000;	% Wegfedersteifigkeit am Auflager in (globale) x-Richtung [N/m]
cY_Auflager=10000000000000000;	% Wegfedersteifigkeit am Auflager in (globale) y-Richtung [N/m]
phiX_Auflager=8.0*10^10;	% Drehfedersteifigkeit am Auflager um die (globale) x-Achse [Nm/rad]
phiY_Auflager=8.0*10^10;	% Drehfedersteifigkeit am Auflager um die (globale) y-Achse [Nm/rad]
cX_Gondel=0;	% Wegfedersteifigkeit am Turmkopf in (globale) x-Richtung [N/m]

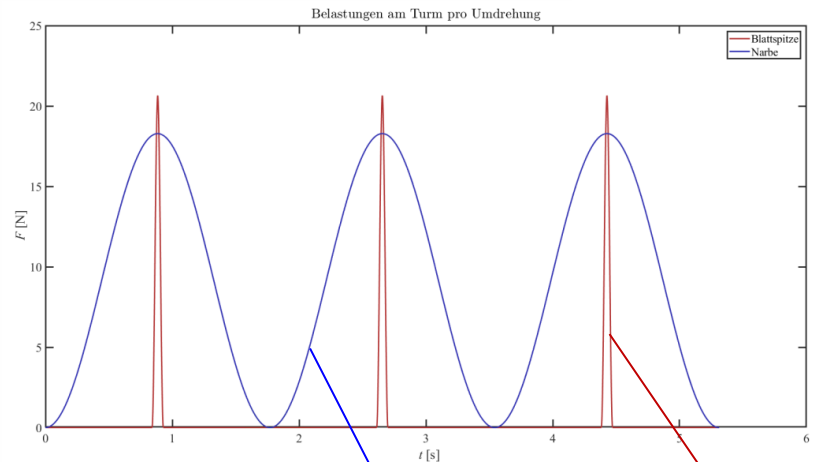
### Massen und Massenträgheitsmomente am Auflager und am Turmkopf

m_Auflager=2961510;	% Masse des Fundaments [kg]
thetaX_Auflager=141965029.8;	% Massenträgheitsmoment des Fundaments um die (globale) x-Achse [kgm <sup>2</sup> ]
thetaY_Auflager=141965029.8;	% Massenträgheitsmoment des Fundaments um die (globale) y-Achse [kgm <sup>2</sup> ]
thetaZ_Auflager=281995008.6;	% Massenträgheitsmoment des Fundaments um die (globale) z-Achse [kgm <sup>2</sup> ]
m_Gondel=209932;	% Masse der Gondel [kg]
thetaX_Gondel=309440;	% Massenträgheitsmoment der Gondel um die (globale) x-Achse [kgm <sup>2</sup> ]
thetaY_Gondel=309440;	% Massenträgheitsmoment der Gondel um die (globale) y-Achse [kgm <sup>2</sup> ]
thetaZ_Gondel=309440;	% Massenträgheitsmoment der Gondel um die (globale) z-Achse [kgm <sup>2</sup> ]

## Stabwerksprogramm auf MATLAB Basis - Lastansatz



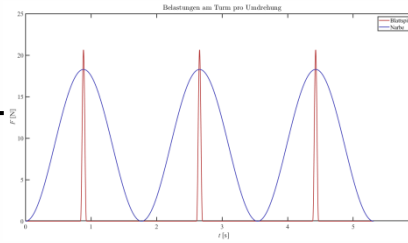
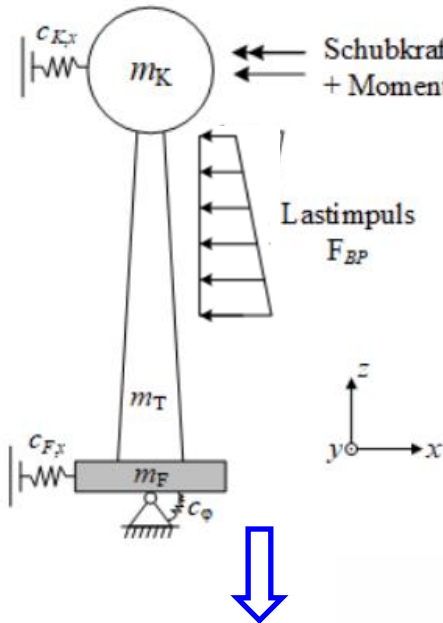
Aufbringen eines Lastimpulses auf den Turm im Bereich der Flügelpassage



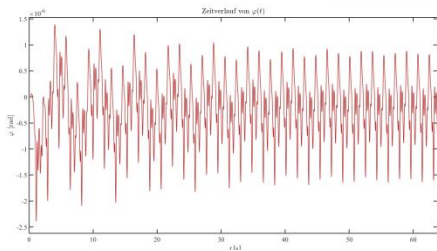
Verlauf der Lastimpulses abhängig von

- Höhe des Angriffspunktes
- Turmdurchmesser
- Rotationsgeschwindigkeit

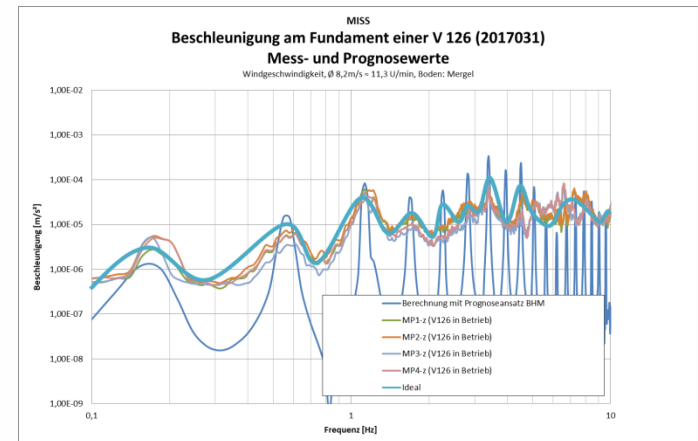
### Stabwerksprogramm auf MATLAB Basis - Ausgabe



### Zeitverlauf der Fundamentdrehung



### Spektrum am Fundament





## AP 1.1

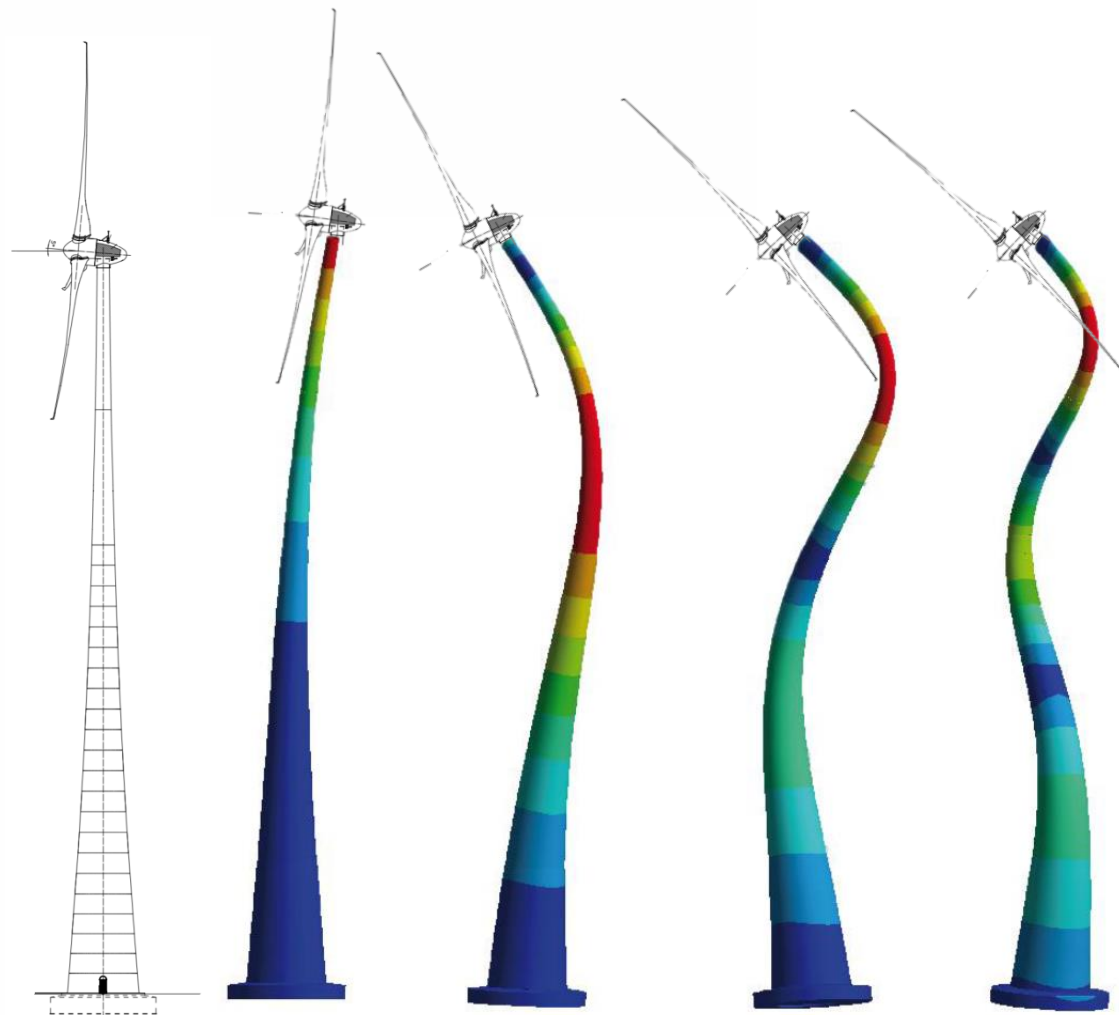
Ermittlung der Schwingungseigenschaften einer WEA im Hinblick auf die Schwingungsemission

## AP 1.2

Prognose der Schwingungsemissionen am Turmfuß

## AP 3.1

Minderung der Störwirkung an der Quelle



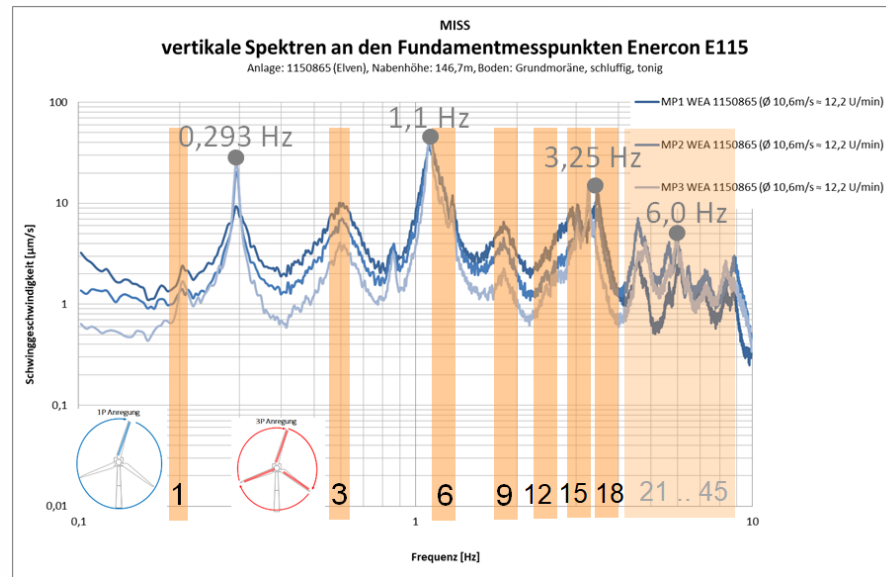


### Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- 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 al. 1971)

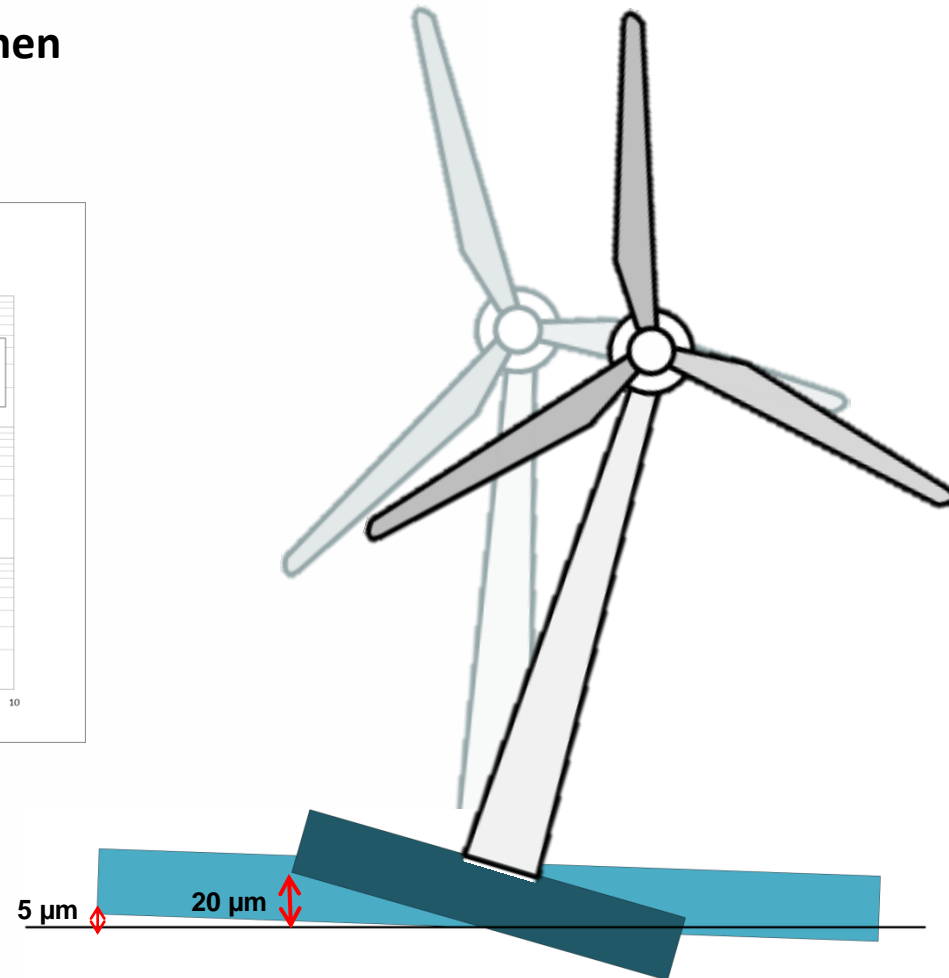
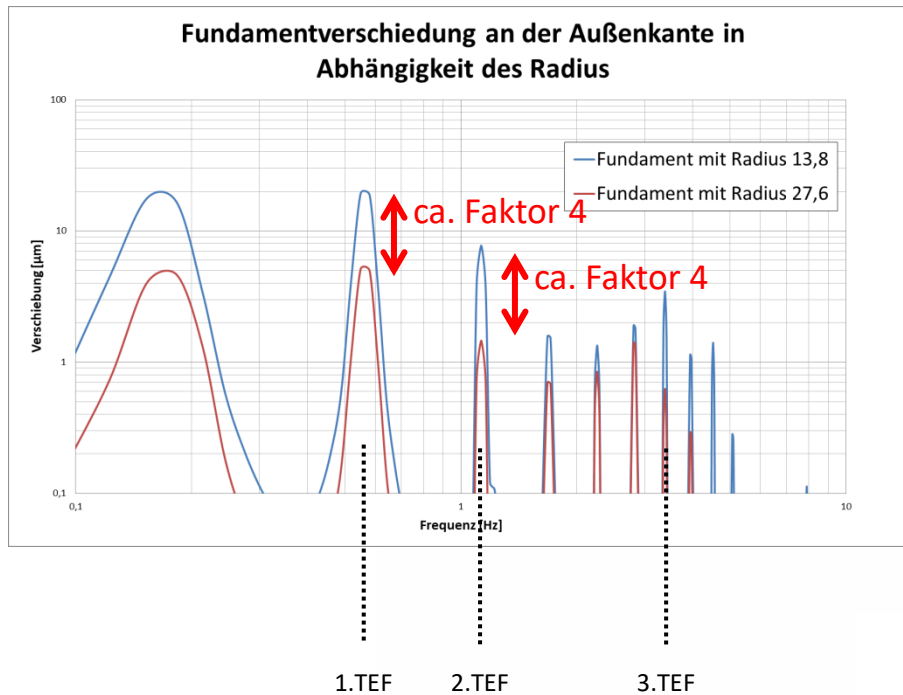
$$K_{\varphi} = \frac{8G_d r^3}{3(1 - \nu)}$$

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



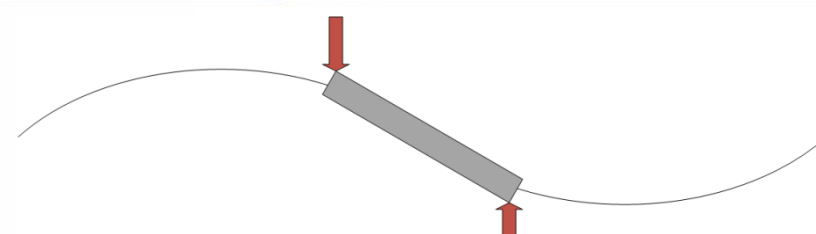
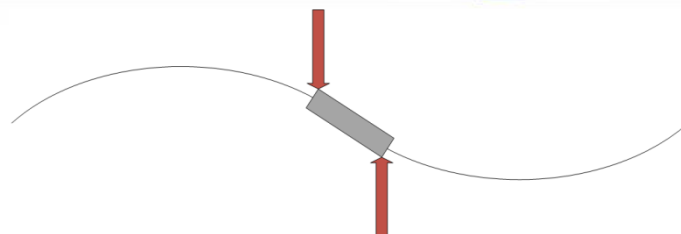
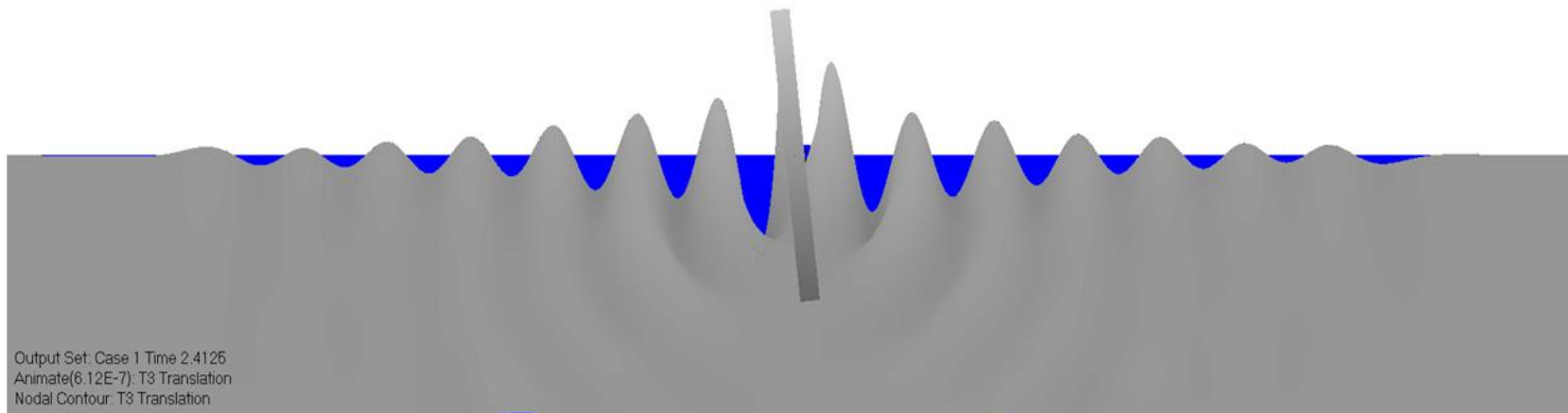
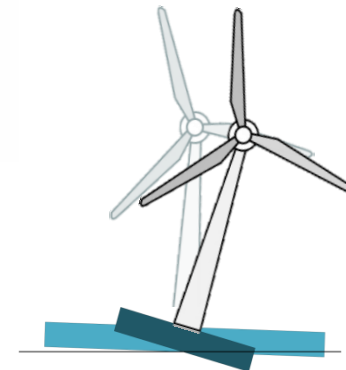
**Auswirkung Fundamentradius im unmittelbaren Nahfeld nachweisbar**



## Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

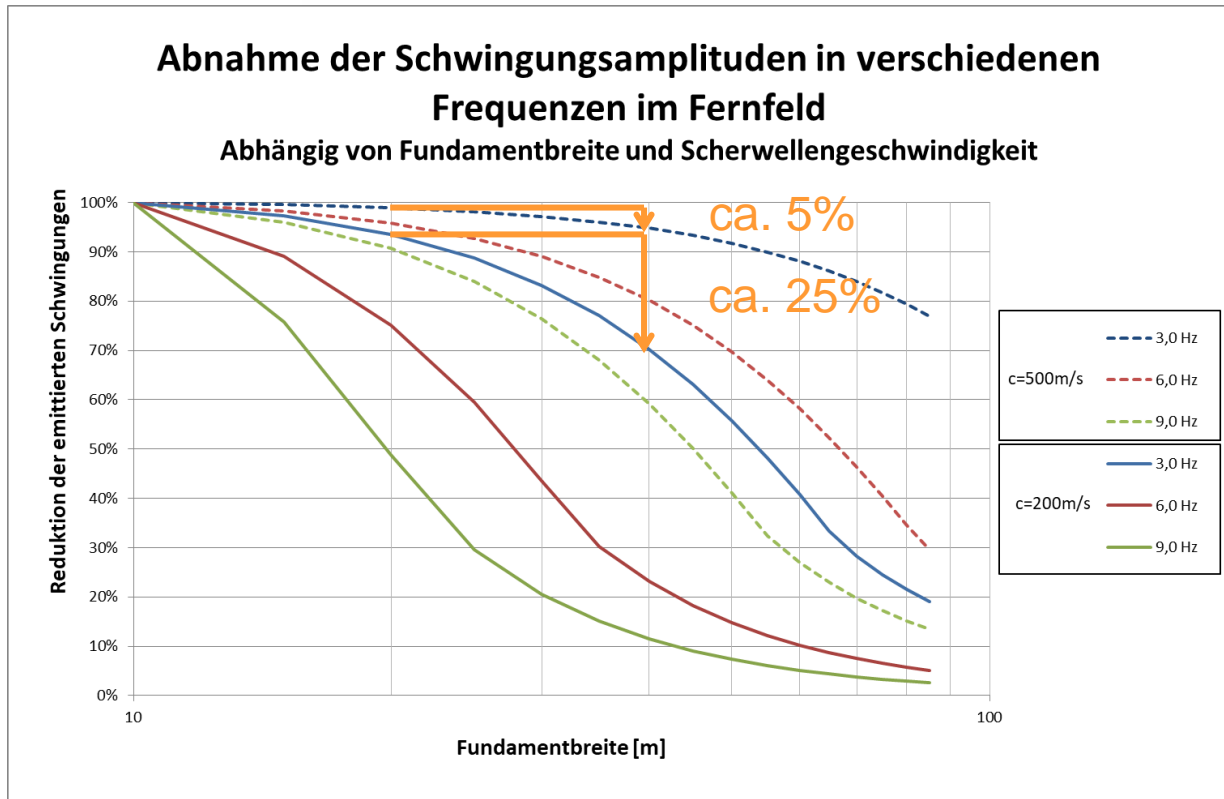
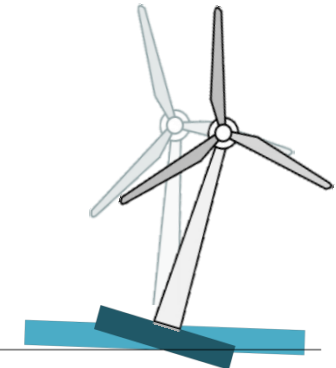
- Veränderung der Fundamentierung (Auswirkungen Fernfeld)

V:1  
L:10  
C:1



### Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

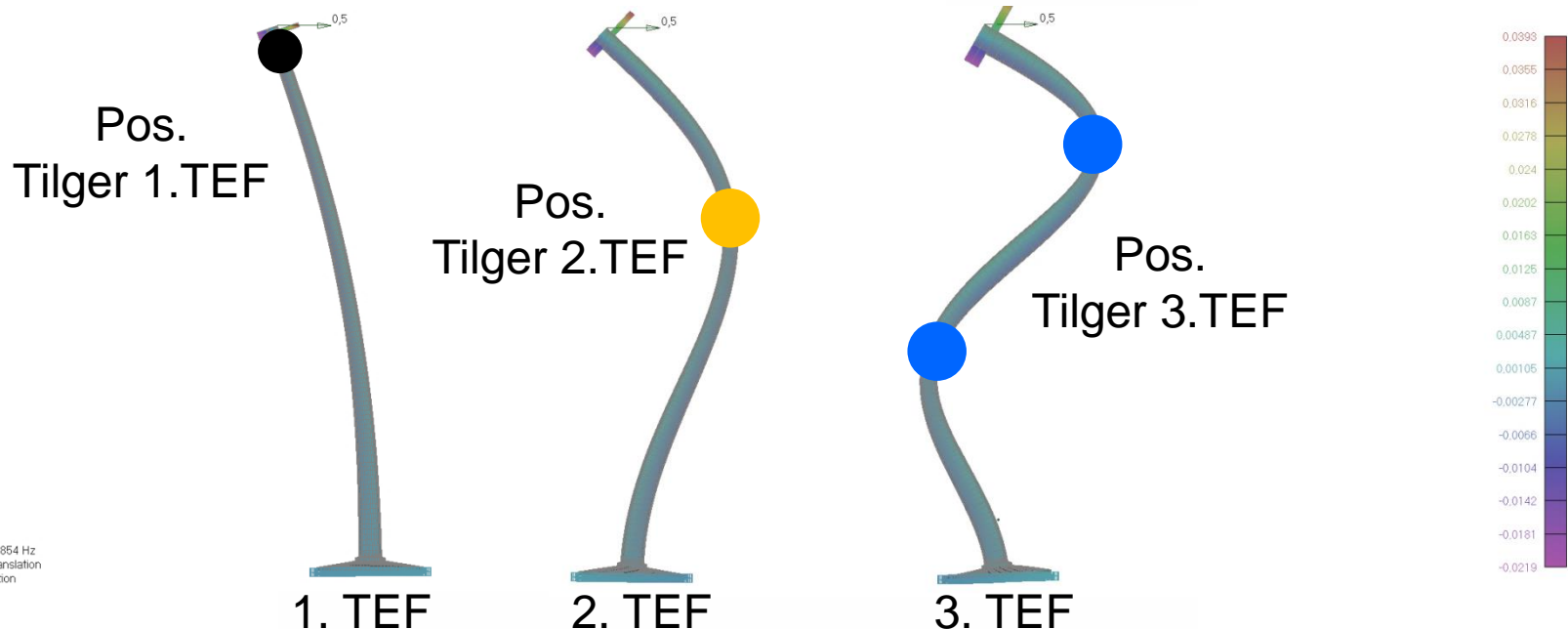
- Veränderung der Fundamentierung (Auswirkungen Fernfeld)



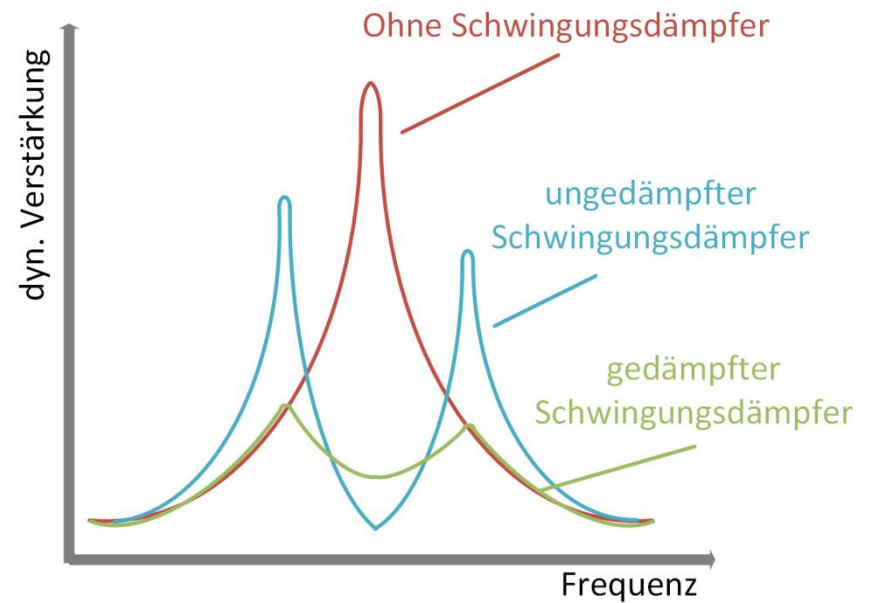
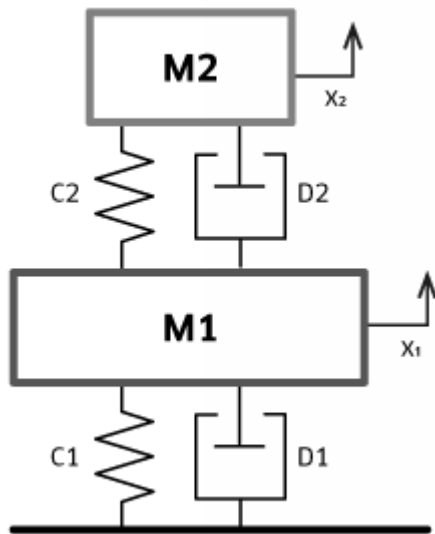
## Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- 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.

V.1  
L.2  
C.1

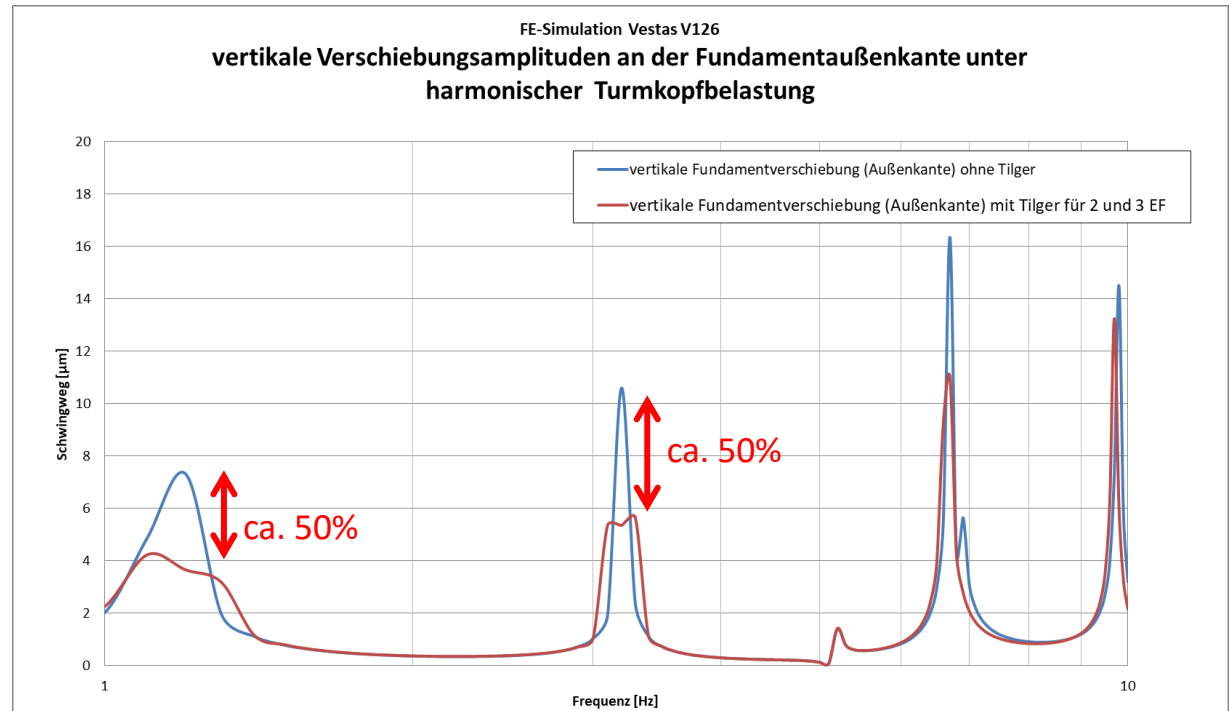
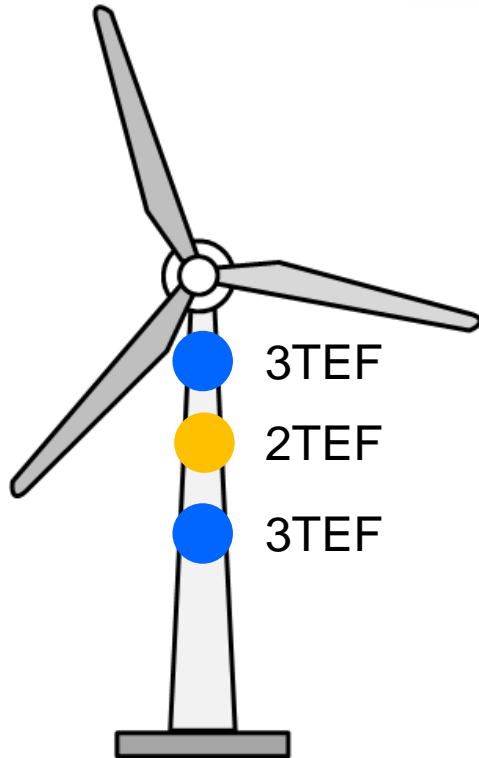


## Exkurs - Schwingungsdämpfer



### Untersuchung von Minderungsmaßnahmen

- Einsatz von Dämpfern an einem Stahlturm (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](http://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.

