Türme & Fundamente – höchste Ansprüche an die Basis

LTE-Bewertung: Welche Daten ab Tag 1?

Prof. Dr. Holger Lange (PEC)
Matthias Saathoff (apera)

Spreewindtage 2025,
Potsdam, Germany

apera engineers

Gegründet 2025
als apera engineers
GmbH in Hamburg

>10 Jahre Erfahrung
als Abteilung “Lasten &
Standort” bei der
P. E. Concepts GmbH

Kleines und schlagkräftiges
Team von 5 erfahrenen
Ingenieur:innen

Optimierung über den gesamten Lebenszyklus

BETRIEB / PARKERWEITERUNG

- Asset-Optimierung
- Lebensdauer- bzw. Ertragssteigerung
- Technische Beratung

PLANUNG / GENEHMIGUNG

- Lastrechnung für Standorteignung (BImschG)
- Layoutoptimierung
- Vorabschätzung zu Standortlasten

WEITERBETRIEB / REPOWERING

- Analytischer Teil der Weiterbetriebsprüfung
- Lebensdauer-Monitoring über Lastmessung
- Optimierung von Repoweringvorhaben

Agenda

- Lebensdauermonitoring
  - Wozu?
  - Was ist das?
  - Was brauche ich dafür?

- Anforderungen bei neueren Turmkonzepten
  - Früherkennung durch Messung der Eigenfrequenz
  - Stahlrohrturmdetails
  - Stahlrohrturmbauabweichungen
  - Betonturmverbindungen
  - Verbindungen segmentierter Turm
  - Herausforderungen

Lebensdauermonitoring

Ziele

- Überwachung des sicheren Anlagenbetriebs
- Validierung der Komponentenlebensdauer
- Feststellen von Veränderungen und deren Auswirkungen

Lebensdauerberechnung

Bewertung der Materialermüdung auf Basis von:

Vergleich der Lasten unter…

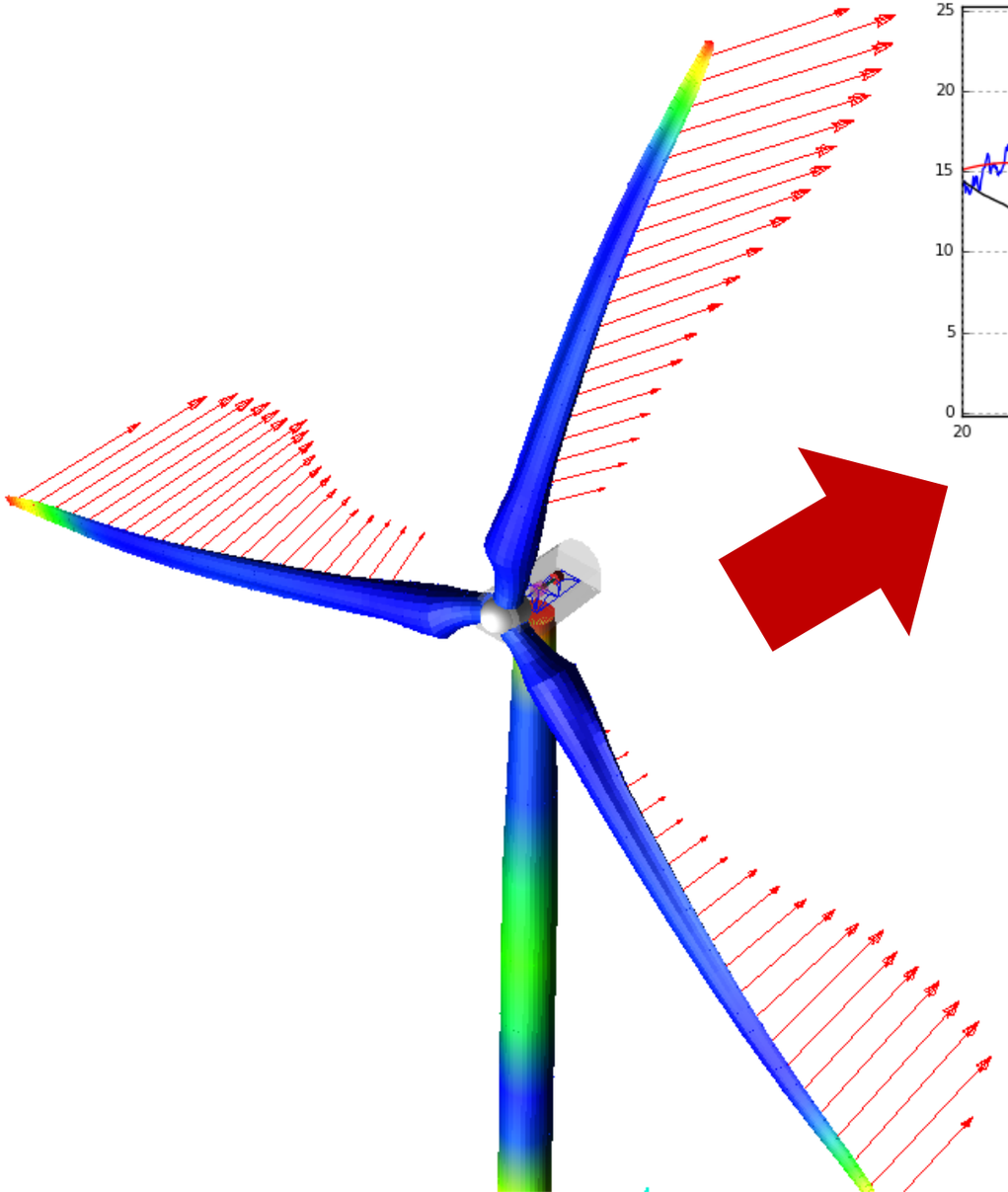
…Auslegungsbedingungen:

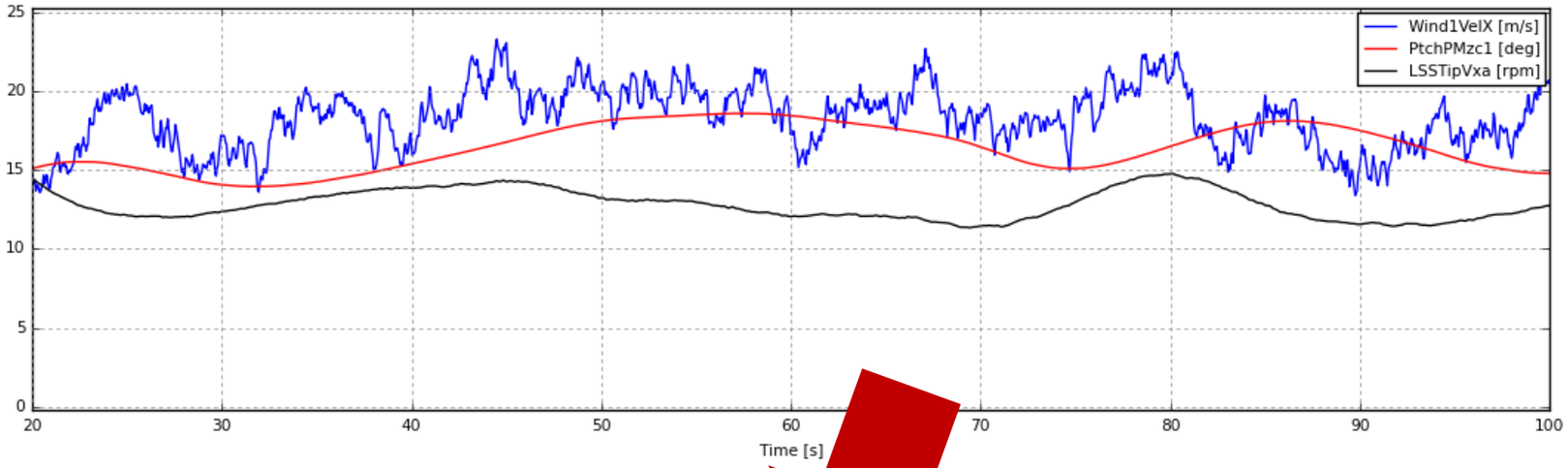
- Tragkapazität
- Soll-Zustand der Anlage

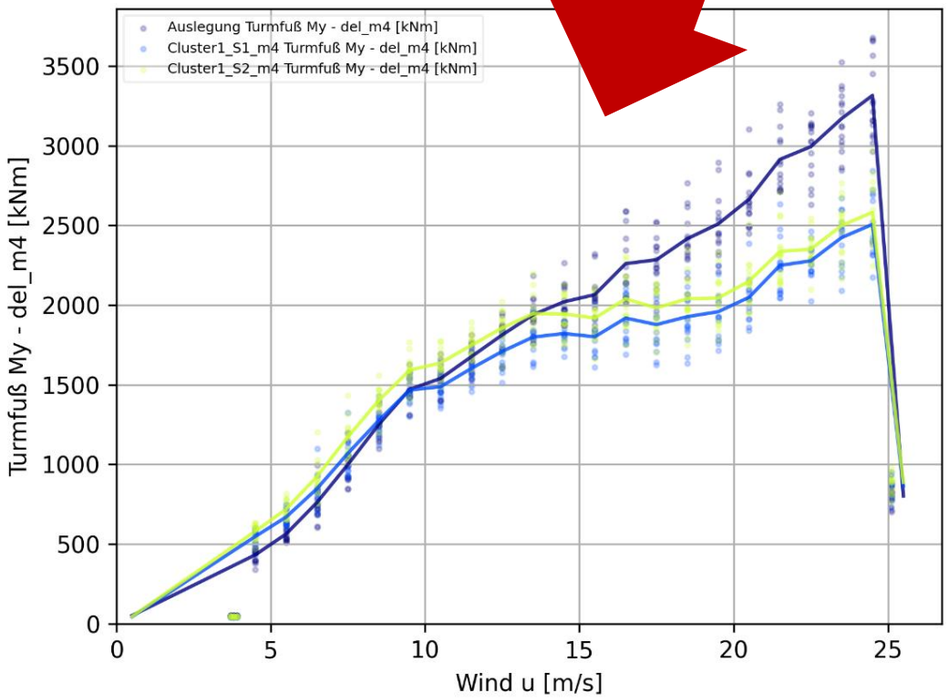
…Standortbedingungen:

- Ermüdungsreserven
- Ist-Zustand der Anlage

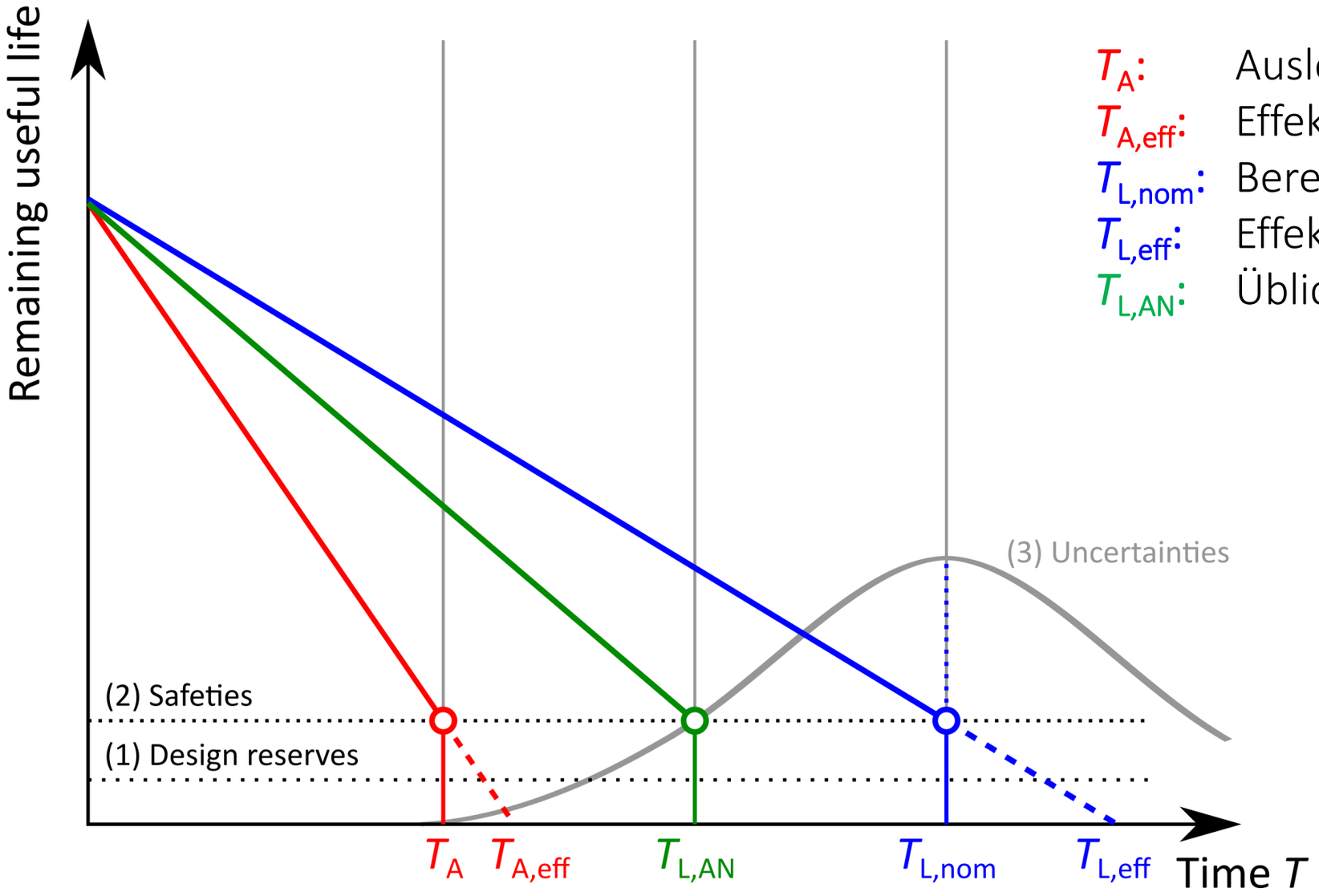
Theoretisch: Simulation







Unsicherheiten



T_A: Auslegungslebensdauer

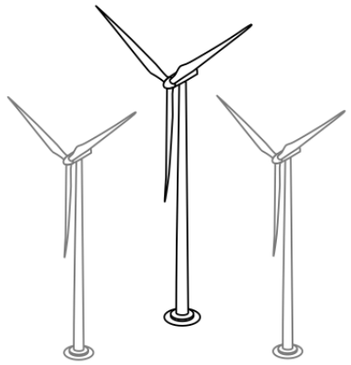
$T_{A,eff}$: Effektive Auslegungslebensdauer

$T_{L,nom}$: Berechenbare Lebensdauer (Standort)

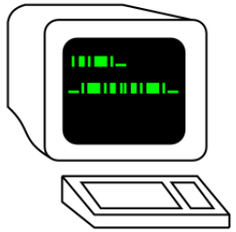
$T_{L,eff}$: Effektive (tatsächliche) Lebensdauer

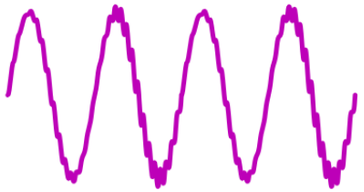
$T_{L,AN}$: Üblicherweise berechnete Lebensdauer

Modellvalidierung

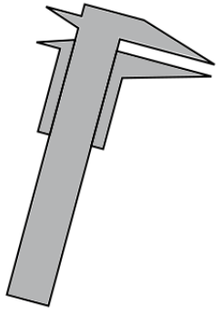


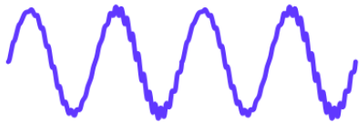
Standort heute





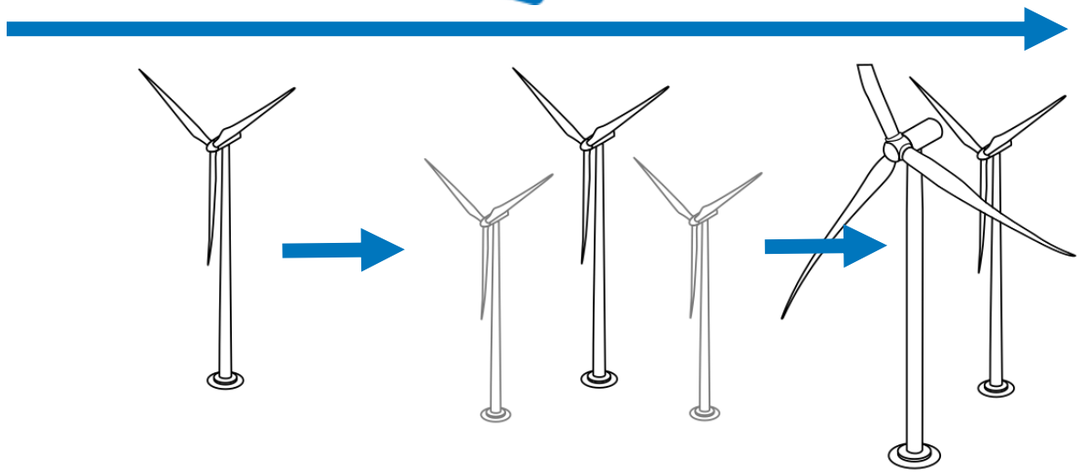
Lebensdauerberechnung (Simulation)



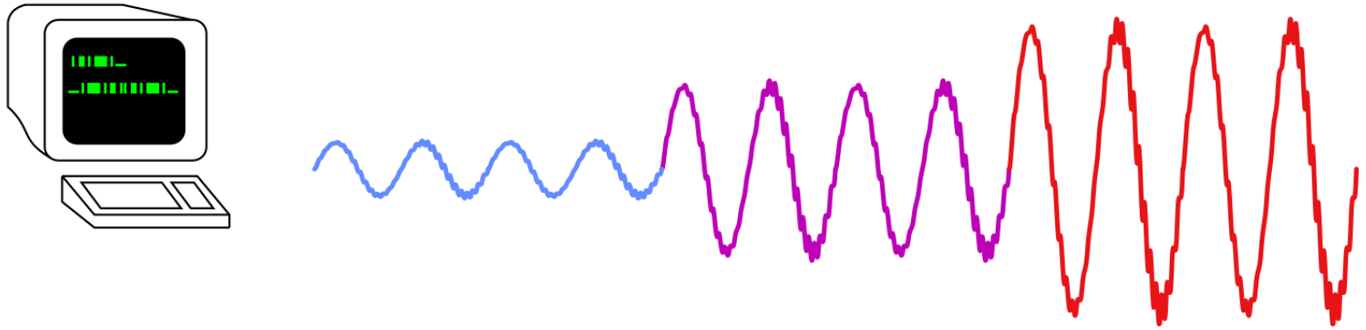


Lastmessung zeigt: Lasten kleiner – alles gut?

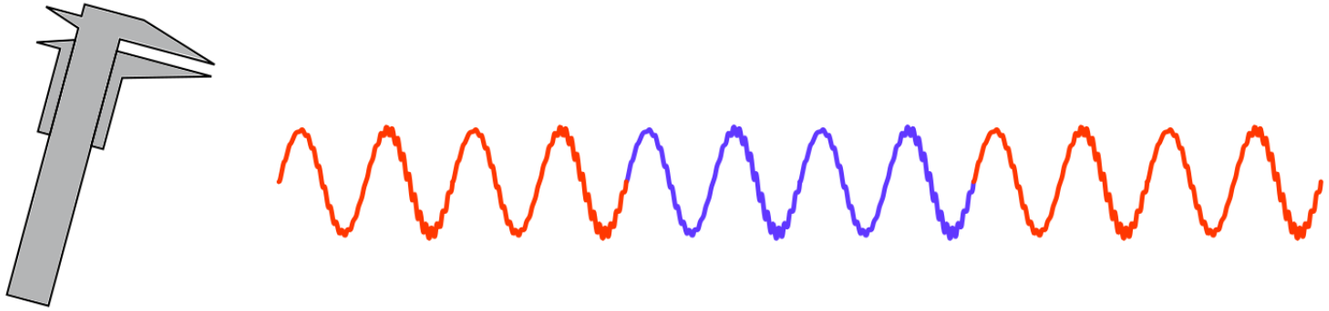
Modellvalidierung



Bedingungen (z.B. Layout) ändert sich mit der Zeit

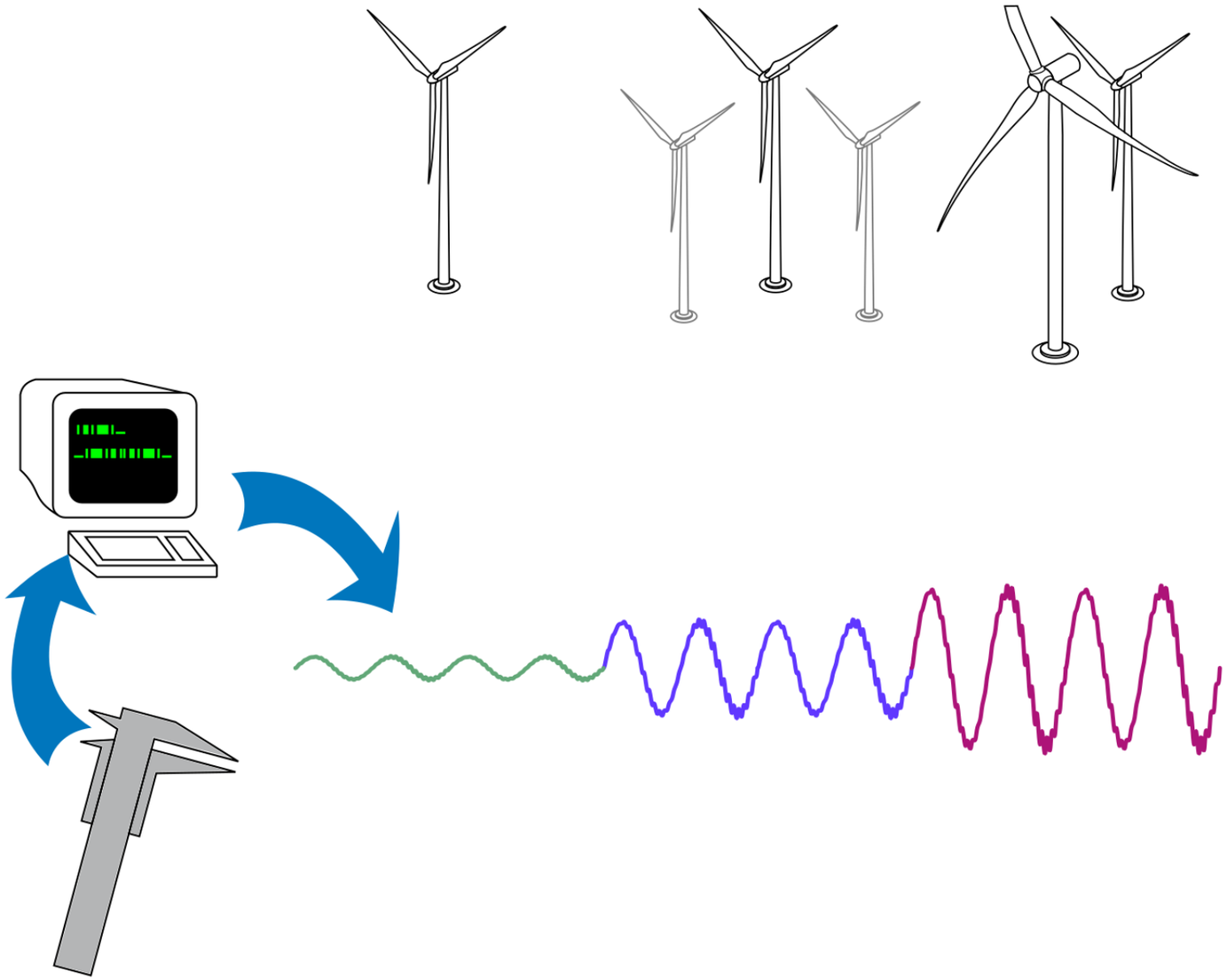


Lebensdauerberechnung (Simulation)



Messung zeigt nur Daten von „heute“

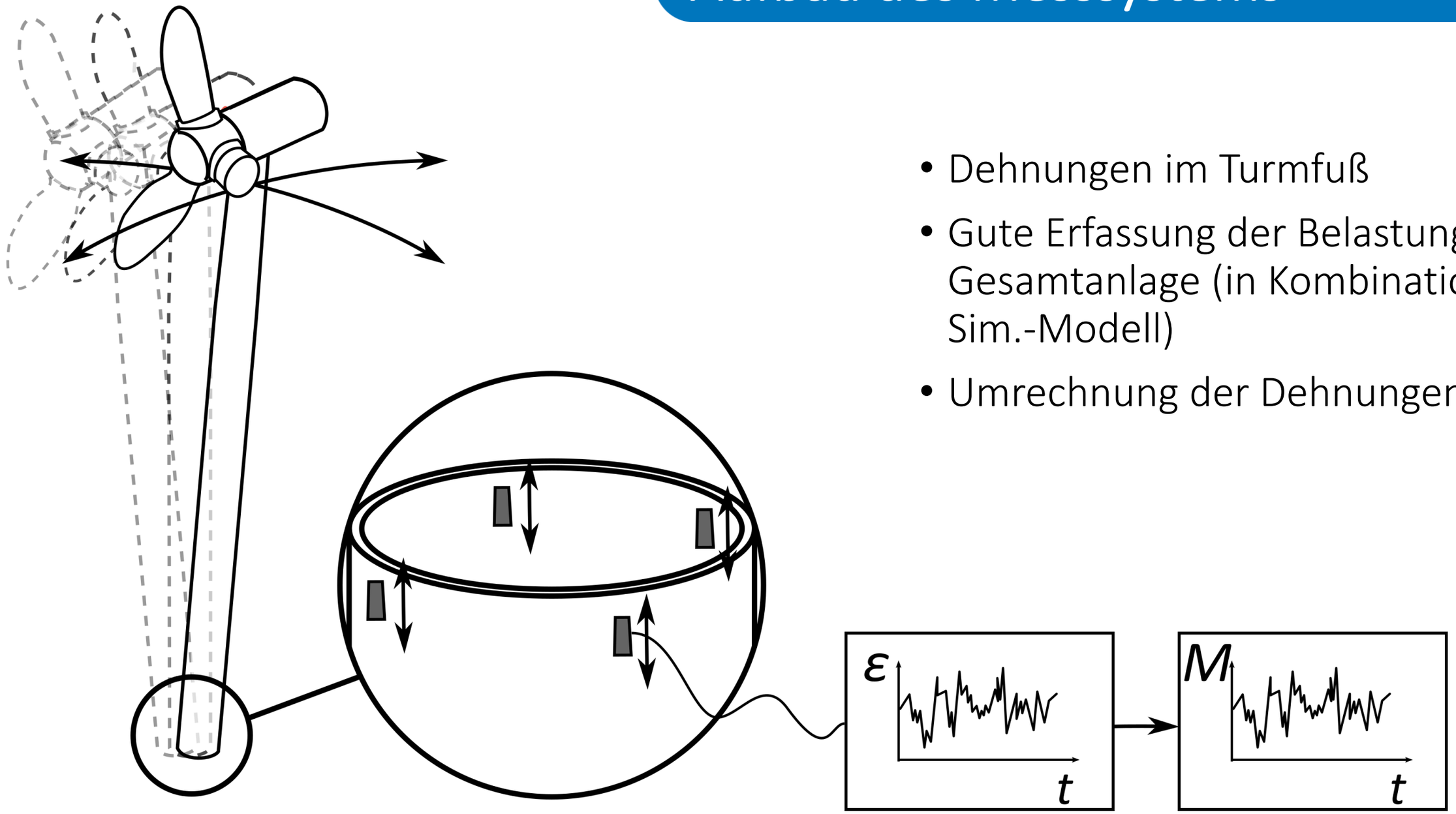
Modellvalidierung



Modellkalibrierung:
Übertragung der Messdaten auf

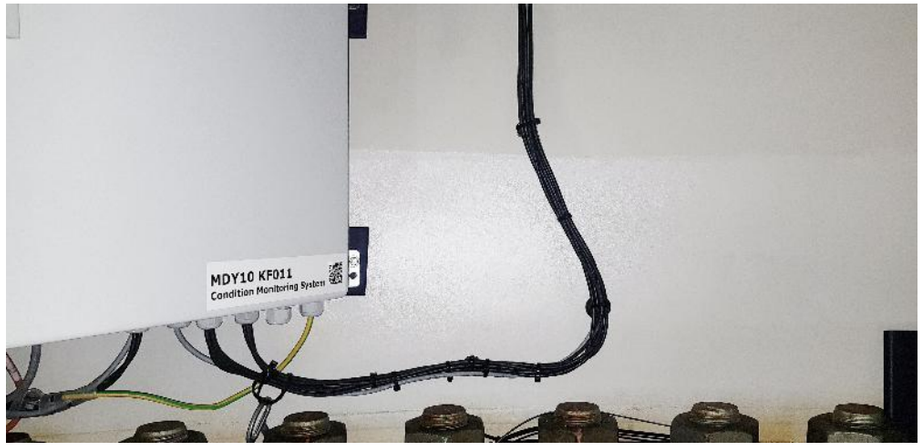
- andere Parklayouts (Zeitabschnitte, Szenarien, …)
- alle relevanten Anlagenkomponenten

Aufbau des Messsystems



- Dehnungen im Turmfuß
- Gute Erfassung der Belastungen auf Gesamtanlage (in Kombination mit Sim.-Modell)
- Umrechnung der Dehnungen in Lasten

Aufbau des Messsystems



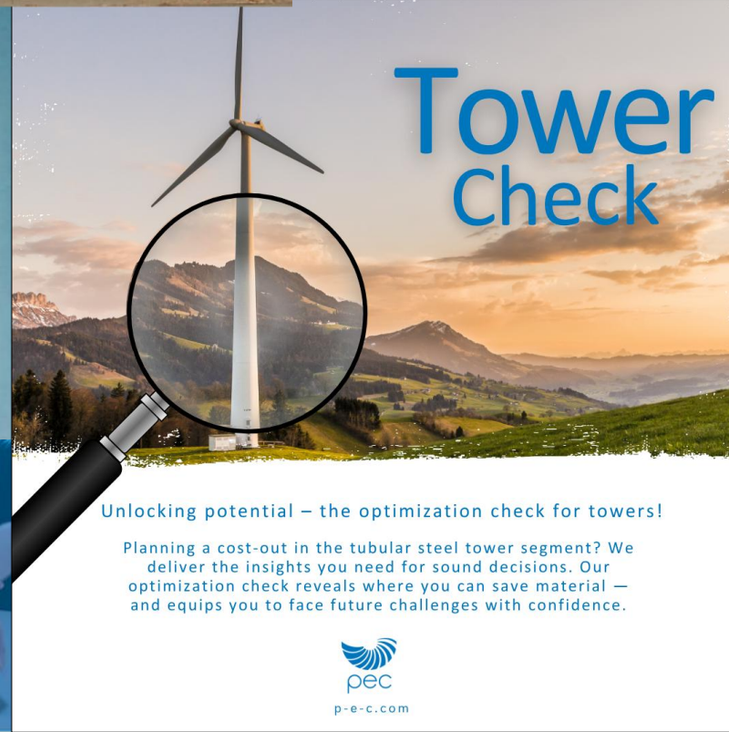
- Standard-System für Lebensdauermonitoring entwickelt
- Je nach Problemstellung oder Konstruktion: Zusatzfeatures nötig

Büros

Essen | Bremen

Kunden weltweit

ISO 9001 Zertifiziert



Agenda

- Lebensdauermonitoring
  - Wozu?
  - Was ist das?
  - Was brauche ich dafür?

- Anforderungen bei neueren Turmkonzepten
  - Früherkennung durch Messung der Eigenfrequenz
  - Stahlrohrturmdetails
  - Stahlrohrturmbauabweichungen
  - Betonturmverbindungen
  - Verbindungen segmentierter Turm
  - Herausforderungen

Turmüberwachung

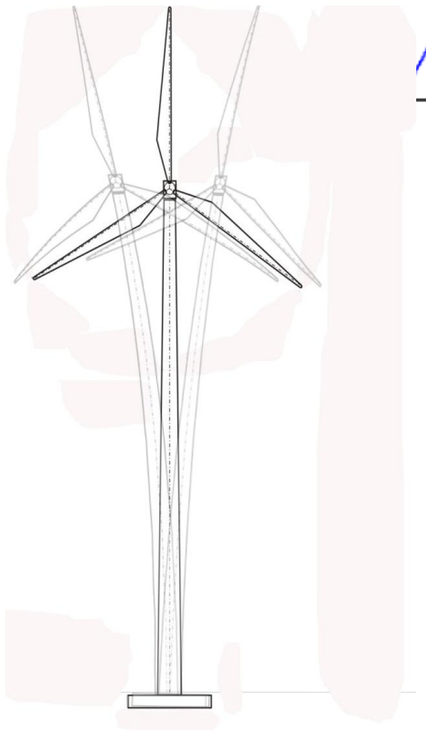
Was passiert, wenn die Annahmen eines Turmes nicht realisiert wurden?

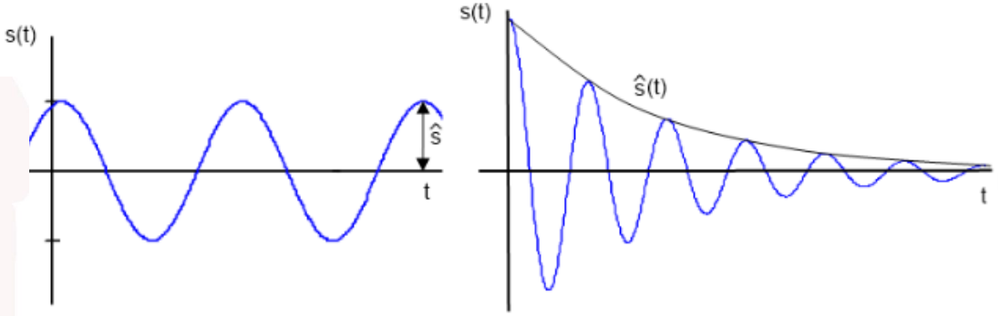
- Auslegungsfehler:
  - Berechnungen, Zeichnungen
- Materialfehler:
  - Materialeigenschaften, Hohlräume, falsche Materialien
- Fertigungsfehler:
  - Lochdurchmesser, Schrauben, Schweißnähte, Hohlräume, Zwängungen, Imperfektionen
- Transportfehler:
  - Schleifspuren, Beulen
- Montagefehler:
  - Beulen im Turm, Ovalisierung von Turmsegmenten, Schrauben

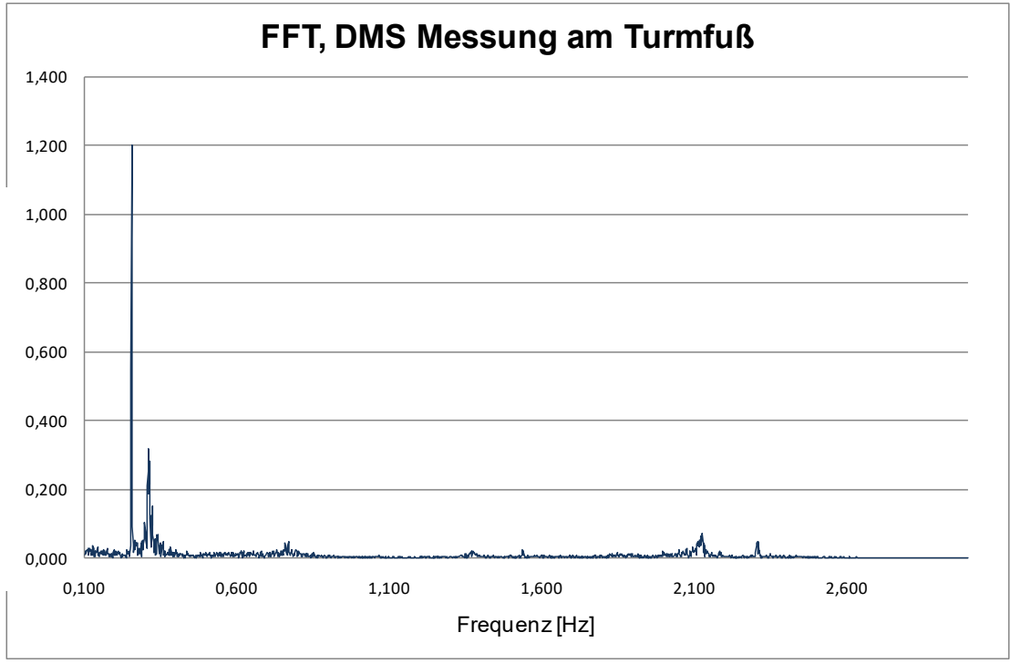
© P. E. Concepts GmbH · 2025

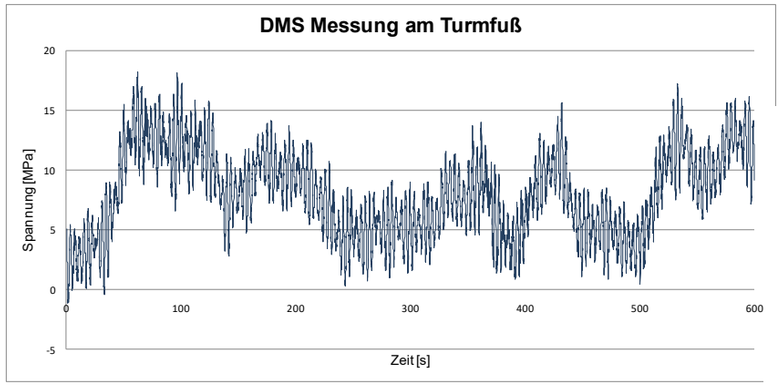
Früherkennung durch Messung der Eigenfrequenz

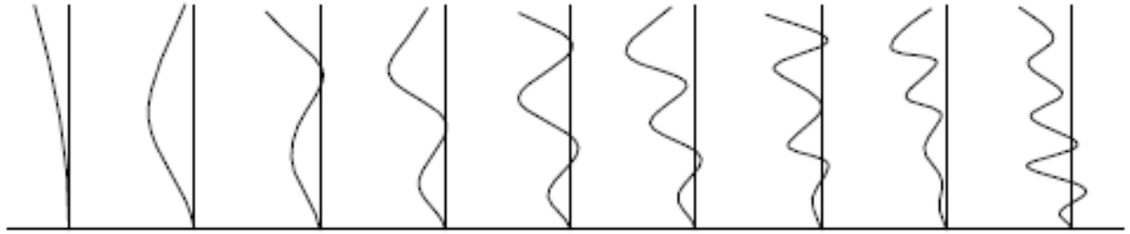
Wie stark müssen Veränderungen sein, damit sich eine Frequenz ändert?







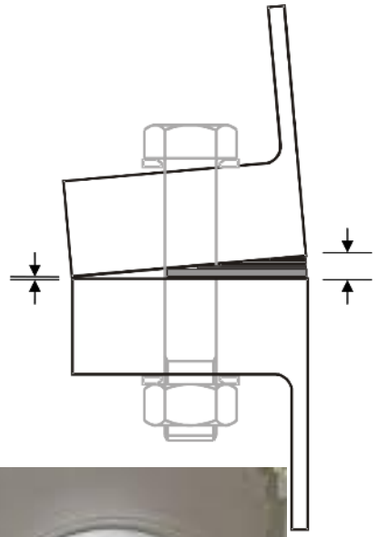


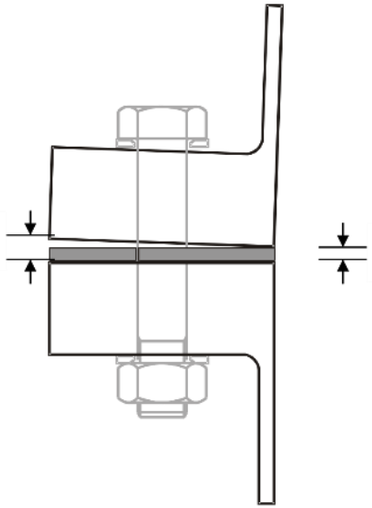


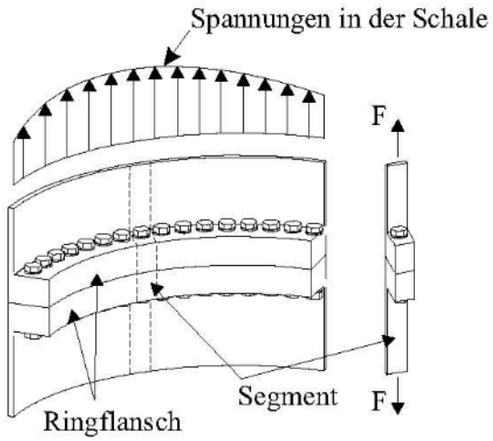
Stahlrohrturmdetails

Elementare Verbindungsdetails

- Flanschklaffungen
- Schraubenvorspannungen
- Schweißnähte







https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53154-9_12

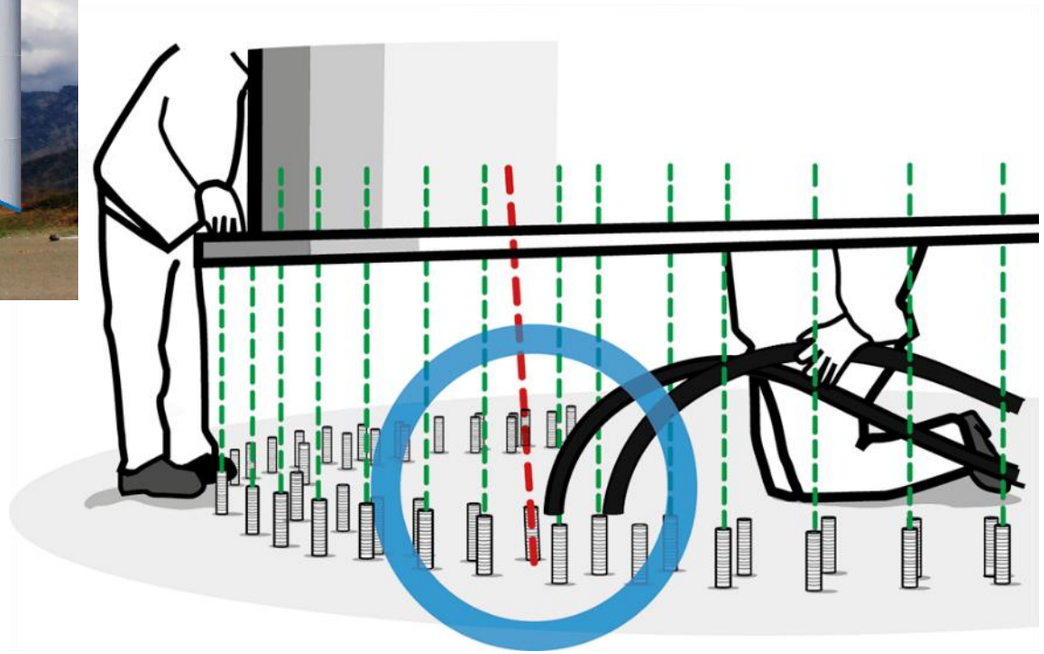
https://www.metawi.de/Deutsch/Leistungen/Ausruestung-fuer-Windkraftanlagen

© P. E. Concepts GmbH · 2025

Stahlrohrturm: Bauabweichungen

Bauabweichungen, die das Tragverhalten deutlich verändern können

- Beulen
- Schraubenlöcher
- Schrauben

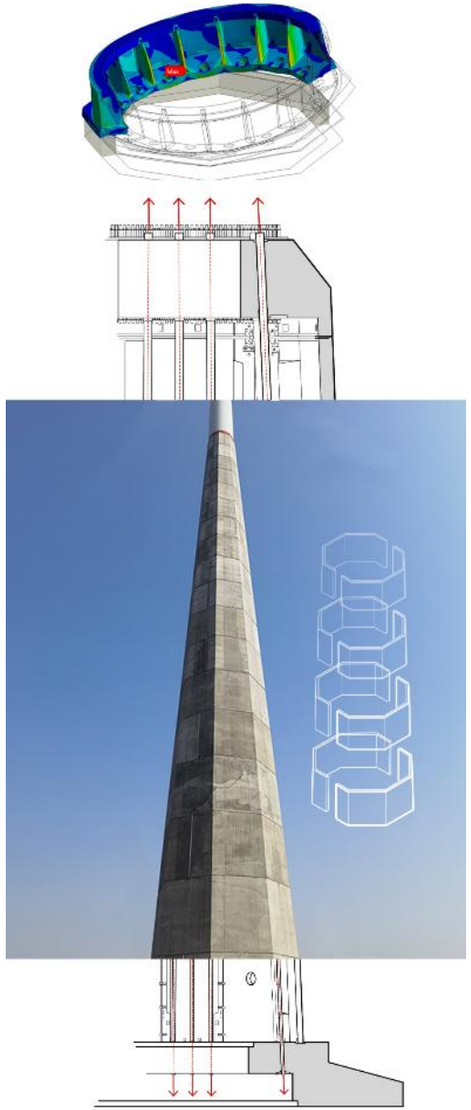


© P. E. Concepts GmbH · 2025

Betonturmverbindungen

Elementare Verbindungselemente und optische Auffälligkeiten

- Vorspannglieder
- Abplatzungen
- Risse
- Horizontale und vertikale Fugen



© P. E. Concepts GmbH · 2025

Gittermastturmverbindungen

Transition piece (Suzlon, 2015).

Elementare Verbindungsdetails

- Schraubenvorspannungen
- Kontaktflächen
- Bindebleche
- Adapterübergänge

© P. E. Concepts GmbH · 2025

Verbindungen segmentierter Turm

Elementare Verbindungsdetails

- Schraubenvorspannungen
- Kontaktflächen
- Flanschverbindungen
- Adapterübergänge

Assembly of a segment of the BSS Towers (Siemens Wind Power, 2012).

Foot flange and lowest friction joint connection of the BSS towers (Siemens Wind Power, 2012).

© P. E. Concepts GmbH · 2025

Herausforderungen

Definition der turmspezifischen Messkampagne zur Überwachung

- Auswahl geeigneter Sensortechnik
- Festlegung benötigter Messdatengenauigkeit
- Abwägung der Kosten gegenüber Sichtprüfung
- Wie belastbar sind die Aussagen der Messungen?

© P. E. Concepts GmbH · 2025

Benötigte Informationen

- Auslegungsdokumente:
  - Spezifikation der Auslegungsbedingungen
  - c_p-/c_t-Kurven
  - Turm-/Fundamentzeichnungen
  - Ggf. Spezifikation Vorspannung, …
- Betriebsdaten (10 Min.-Daten) der vermessenen und umliegenden WEA
- Historie:
  - (Groß-) Komponententausche
  - Controller-Updates
  - Änderungen an der Betriebsführung
  - Fehlerprotokolle, Inspektionsberichte
- Standortbewertung (Site Assessment)

Benötigte Informationen

Für die Hartgesottenen:

IEC TS 61400-28

Edition 1.0 2025-03

TECHNICAL SPECIFICATION

Wind energy generation systems –
Part 28: Through-life management and life extension of wind power assets

5 Data management, requirements and uncertainty 28
5.1 Preamble 28
5.2 Data management 28
5.3 Data and information definition 29
5.4 Data / information sources 30
5.4.1 Design information 30
5.4.2 Meteorological data 31
5.4.3 Wind data from nacelle 31
5.4.4 Extreme site conditions 32
5.4.5 SCADA data 32
5.4.6 Instrumentation 33
5.4.7 Operational experience 33
5.4.8 Maintenance and field history 33
5.4.9 Inspection history 33
5.5 Data requirements for components in the primary load path 34
5.6 Data uncertainty 35
5.7 Classification of uncertainty 36
5.8 Data requirements for new wind farms 36

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!