
ERPROBUNG DER GPS-TECHNIK FÜR DIE ÜBERWACHUNG VON TRAGSTRUKTUREN

A. MOSTBÖCK, Y. PETRYNA, F. NEITZEL
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Dank an: Notus Energy Plan GmbH & Co. KG (Potsdam, Deutschland)

- Motivation
- Beschreibung des Objekts
- Messtechnik und Messvorgang
- Die Finite Elemente Modelle
- Dehnungen und Verschiebungen
- Ergebnis und Ausblick

Motivation und Idee



- Überwachung von Tragstrukturen zur Ermittlung der Beanspruchung und Lebensdauerabschätzung
 - Erfassung der Gondelauslenkung
 - Ermittlung von Dehnungen
 - Messen der Beschleunigungen
- Vergleich mit FE-Modell
- Ergebnisanalysen

Fragestellung



- Kann nicht auch GPS zur Überwachung von WEA nutzen?
- Mit welcher Präzision kann man mit GPS dynamisch messen?
- Reicht nicht ein Sensor um das Verhalten der WEA abzubilden?
- Mit welchem Aufwand kann die Beanspruchung des Turmes ermittelt werden? Vergleich untersch. Technik

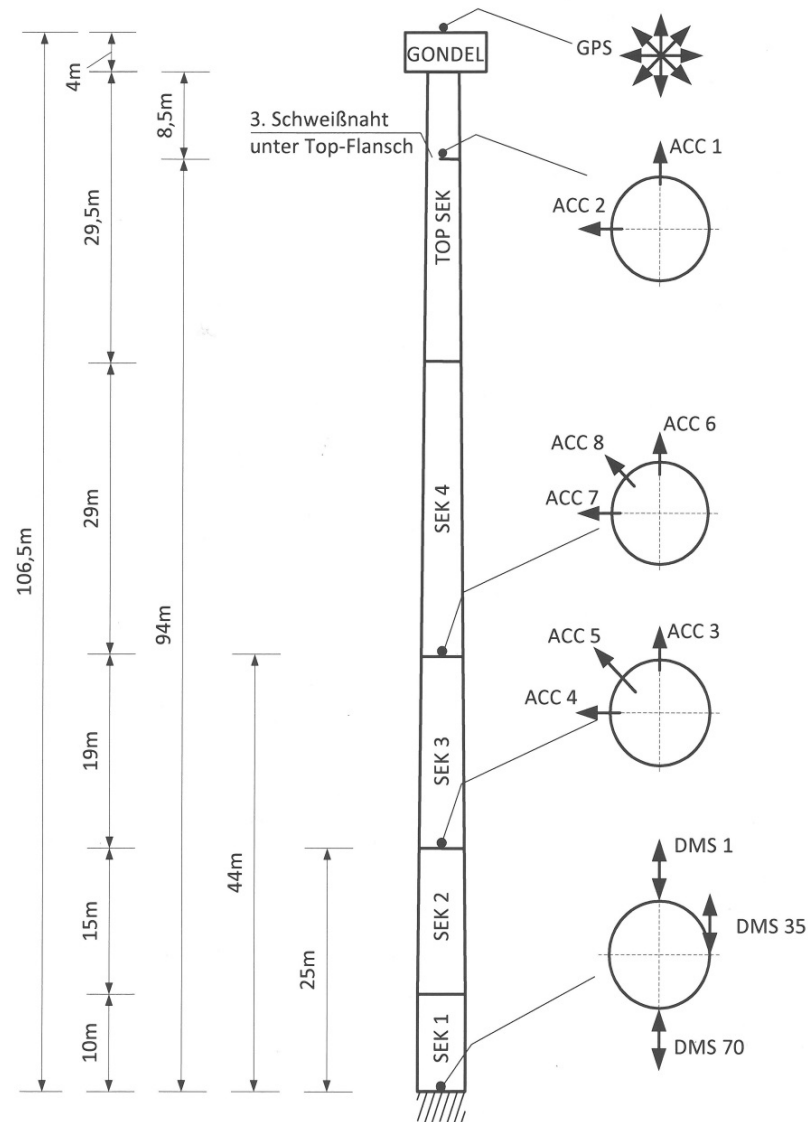
Lässt sich die Technik wirtschaftlich einsetzen?

Das Objekt



- ❑ 2,0 MW-Generator
- ❑ Nabenhöhe: 105 m
- ❑ Rotordurchmesser: 90 m
- ❑ Quadratische Fundamentplatte aus Ortbeton C30/37, Kantenlänge von 15,6 m
- ❑ Gesamtmasse von 335 t, davon 68 t Maschinenhaus, 36 t Rotor, 231 t Turm

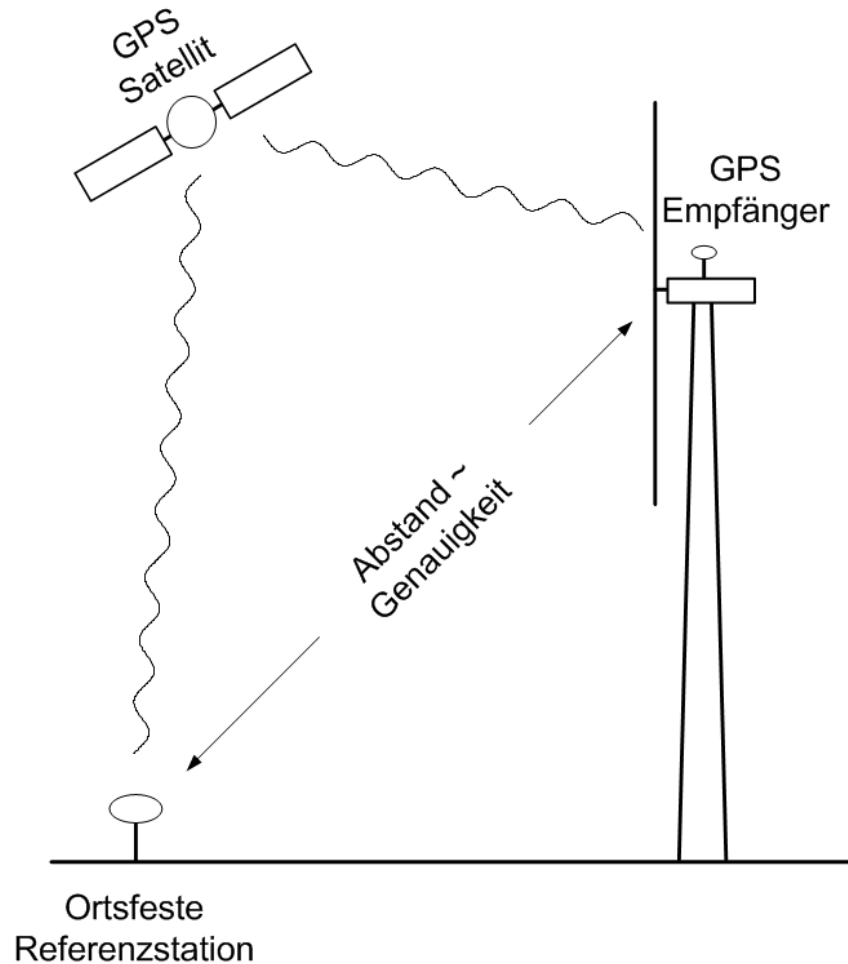
Die Messtechnik



□ Global-Positioning-System (GPS) auf der Gondel, Ausführung als differentielles System (DGPS)

□ Beschleunigungsaufnehmer (ACC) auf 3 Ebenen (horizontal)

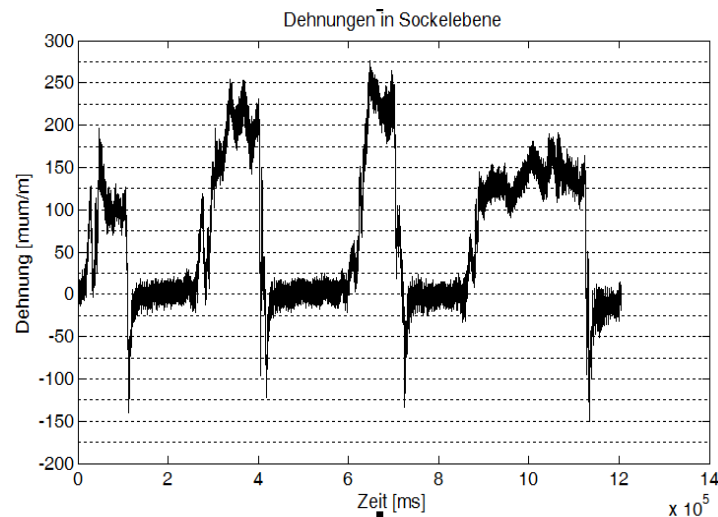
□ Dehnungsmessstreifen (DMS) in Bodenebene (Vertikal)



- GPS an Windenergieanlage (auf der Gondel)
- Ortsfester Empfänger dient als Referenzpunkt (RP)
- Positionsbestimmung des RP
- Exakte Positionsbestimmung der Gondel durch Ausgleichsrechnung an Referenzpunkt
- Offline-Auswertung

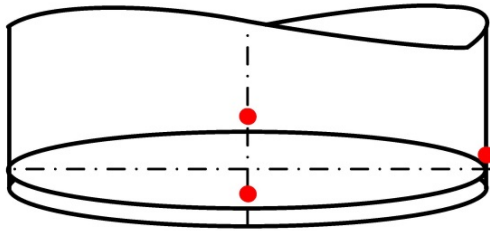
(nachträglich)

Der Messvorgang



- Messung in Betriebs- und Ruhephasen zur Erfassung des Gesamtverhaltens
- Erfassung der Größe der quasi- statischen Auslenkung
- Abschätzen der Plausibilität der Ergebnisse, bspw. durch Biegetheorie, numerische Integration der Beschleunigungswerte oder visuelles Erfassen

Abschätzung durch Biegetheorie: Dehnungen

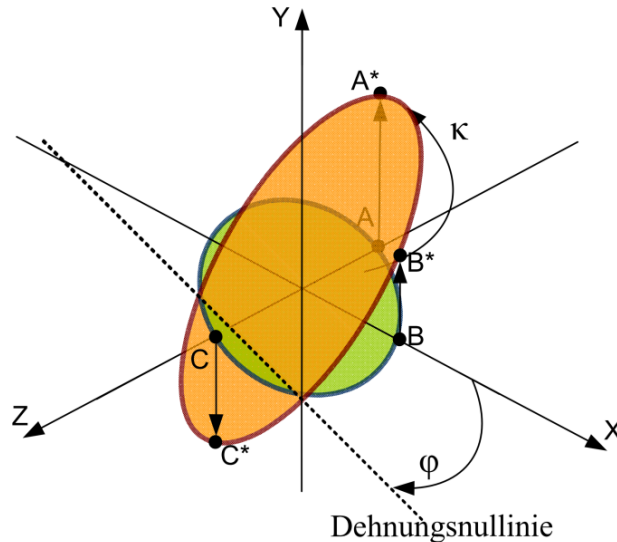


□ Anordnung der Dehnungsmessstreifen an drei Punkten

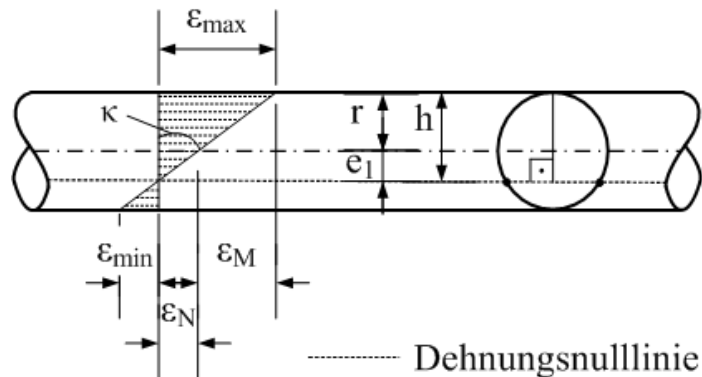
□ Bestimmung der punktuellen Dehnung durch Messung

□ Ermittlung der maximalen Dehnung ε durch Lineare Algebra

→ Ergebnis für Vergleich

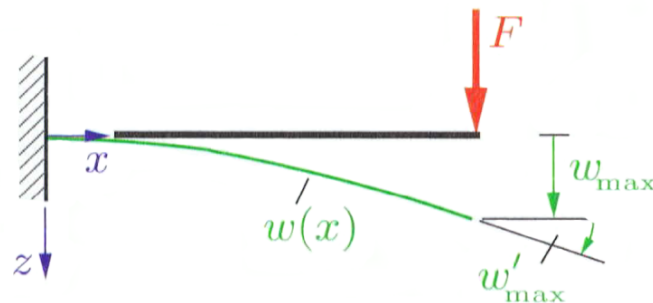


Abschätzung durch Biegetheorie



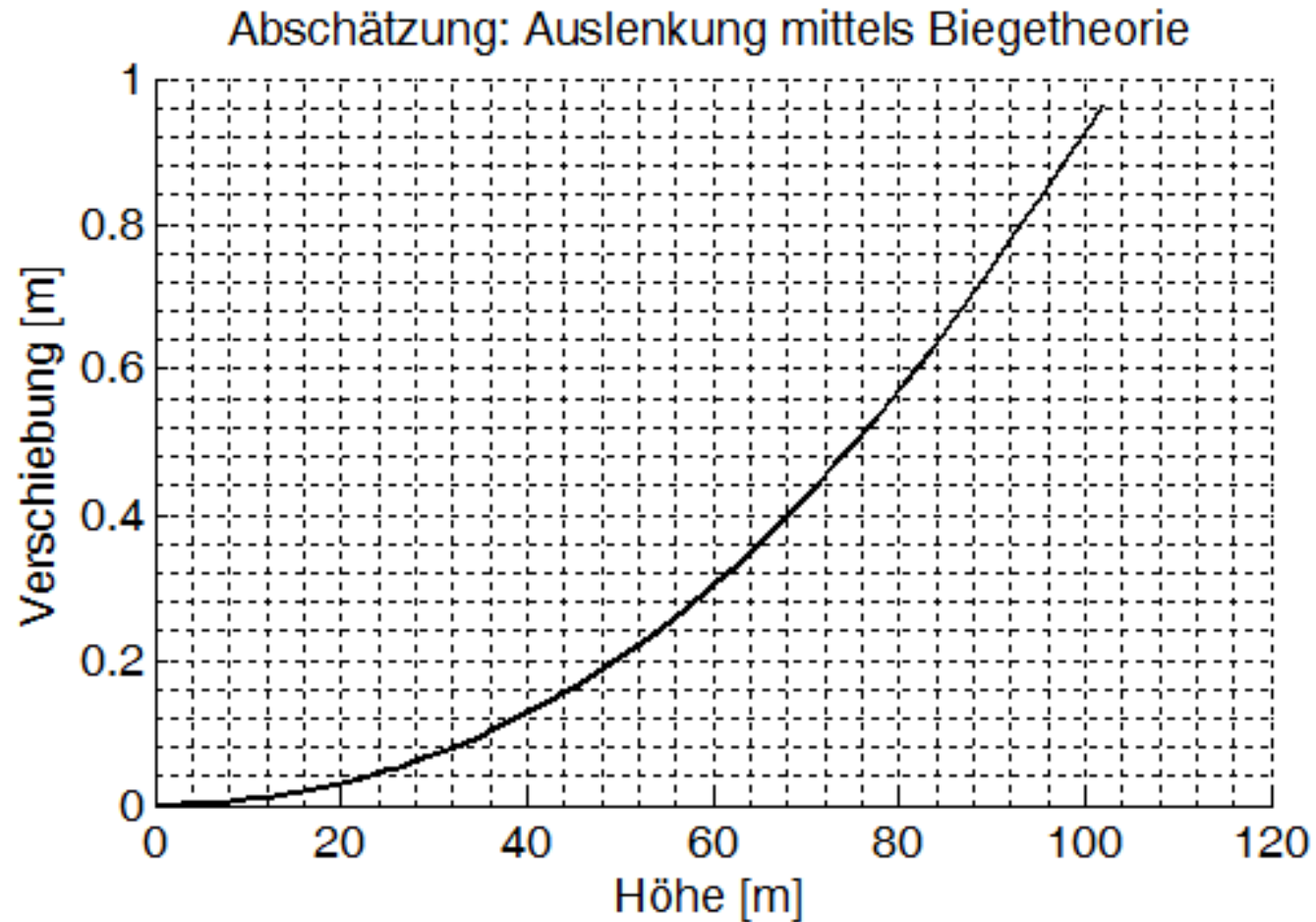
$$\Rightarrow \epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F_N}{EA} + \frac{M_E}{EI_0} z = \kappa \cdot r$$

$$\Rightarrow F = \frac{M_E}{L}$$



- Zusammenhang zwischen Dehnung und Krümmung durch Flächenkennwerte des Querschnitts erfassbar
- Zusammenhang zwischen Kraft, Verformung und Krümmung im linearen Zustand eindeutig
- Durch Steifigkeitsbeziehung entlang der Stabachse sind Werte der Dehnung infolge Verformung an jeder Stelle eindeutig bestimmbar.
- Steifigkeitsbeziehung durch Biegetheorie oder FE-Modell

Ergebnis: Vergleich der Auslenkung

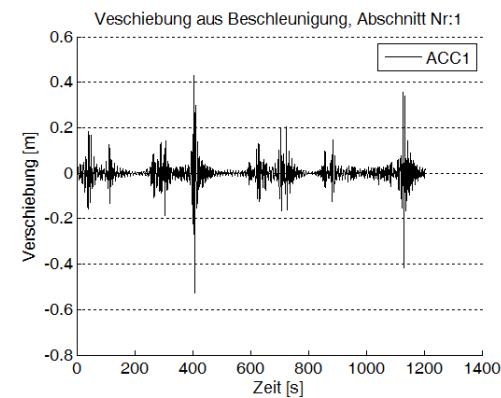
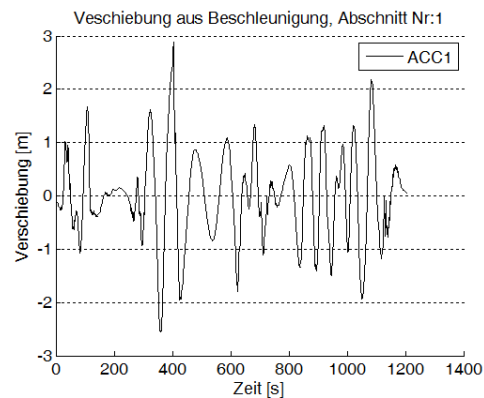
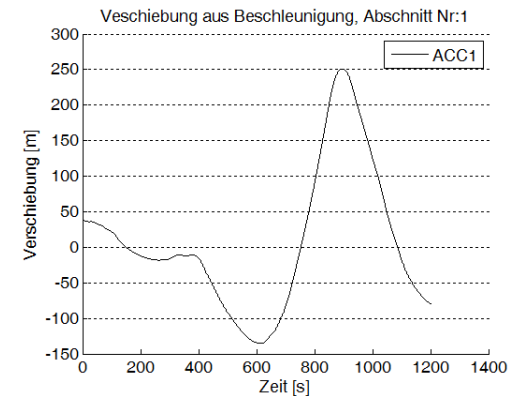
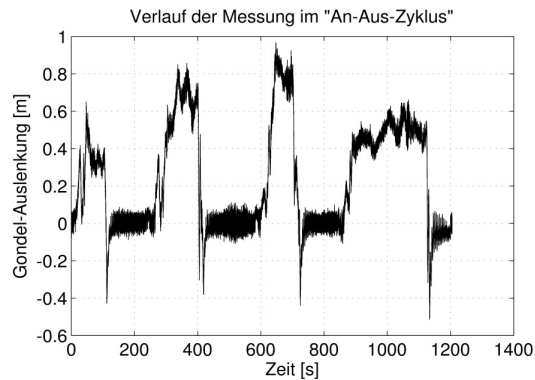


Abschätzung durch Numerische

Integration

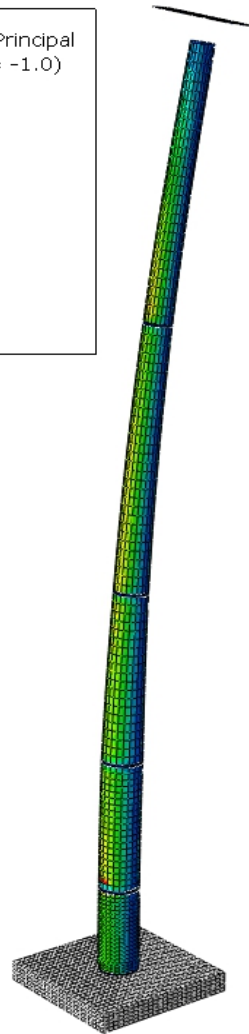
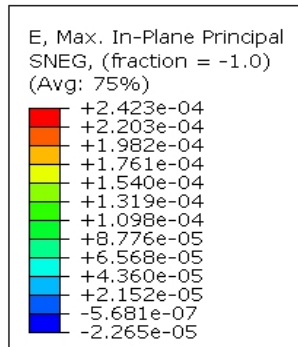
- Integration im Frequenzbereich: $U(j\omega) = \frac{1}{j\omega} V(j\omega) = -\frac{1}{\omega^2} A(j\omega)$
mit: $j = \sqrt{-1}$, $\omega \dots$ Eigenkreisfreq.

- Integration im Zeitbereich: z.B. Trapezformel



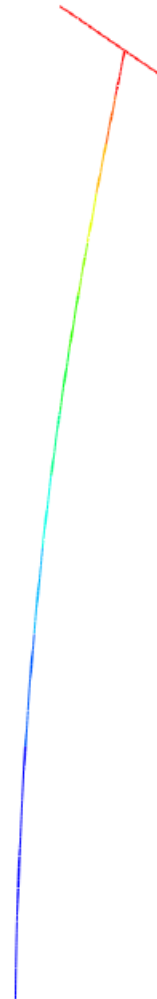
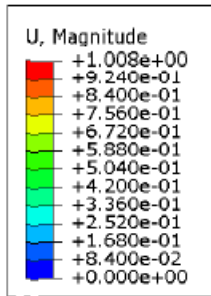


Das FE-Schalen-Modell



- Erstellung des FE-Modells in Abaqus
- Schalen-Rechteck-Elemente
- 20 Knoten/Umfang, etwa quadratische Elemente
- Fundament: Volumen-Elemente
- Gondel als Schale um Gewichtsverteilung zu berücksichtigen

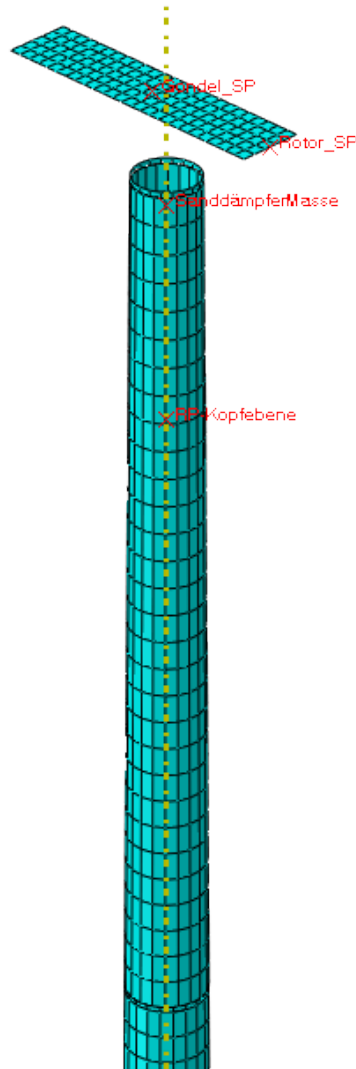
Das FE-Balken-Modell



- Erstellung des FE-Modells in Abaqus
- Balken-Elemente vom Typ B31
(schubweiche Theorie nach Timoshenko)
- Berücksichtigung der veränderlichen Querschnitte
- Fundament: Federelemente
- Gondel: Balken-Elemente mit entsprechend großer

Steifigkeit

Vereinfachungen im Gondelbereich

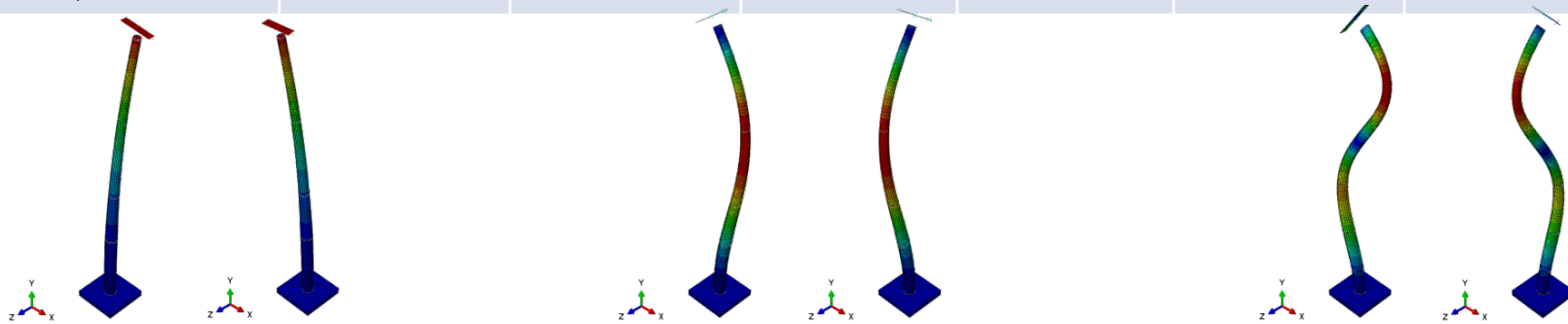


- Rotorblätter durch Einzelmasse berücksichtigt
- Dämpfermassen durch Einzelmasse berücksichtigt
- Schwingungsdämpfer
- Dämpfer zur Reduktion der Geräuschemissionen

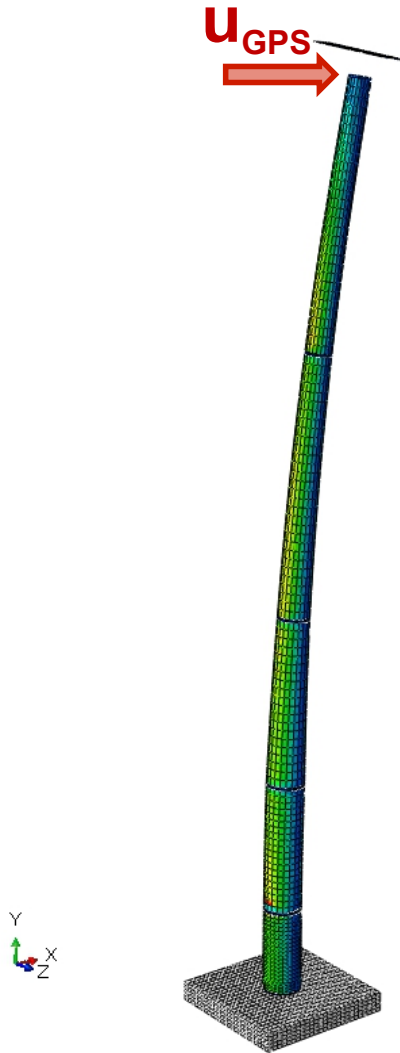
Validierung anhand der Eigenfrequenzen

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0; \quad \omega = 2\pi f$$

Eigen- Frequenzen	(a) FE-Balken-Modell		(b) Messung: Juli 2012		(c) FE-Schalen- Modell	
	Ri. 1 [Hz]	Ri. 2 [Hz]	Ri. 1 [Hz]	Ri. 2 [Hz]	Ri. 1 [Hz]	Ri. 2 [Hz]
$f_{1.1}, f_{1.2}$	0.222	0.222	0.222	0.221	0.215	0.215
$f_{2.1}, f_{2.2}$	1.471	1.505	1.465	1.694	1.438	1.477
$f_{3.1}, f_{3.2}$	-----	-----	3.258	-----	-----	-----
$f_{4.1}, f_{4.2}$	3.894	4.240	4.147	4.158	3.771	4.179



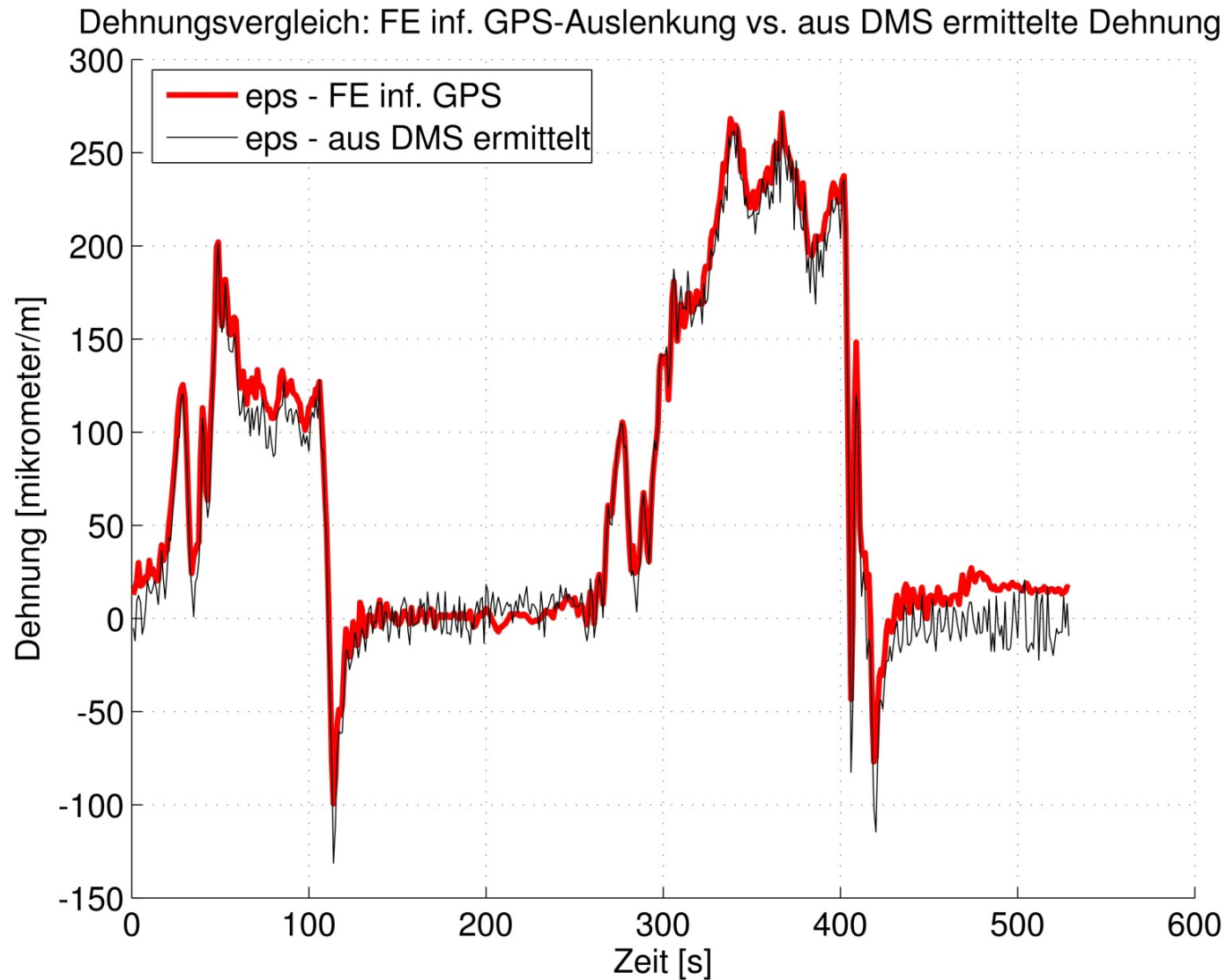
Ermittlung der Dehnungen



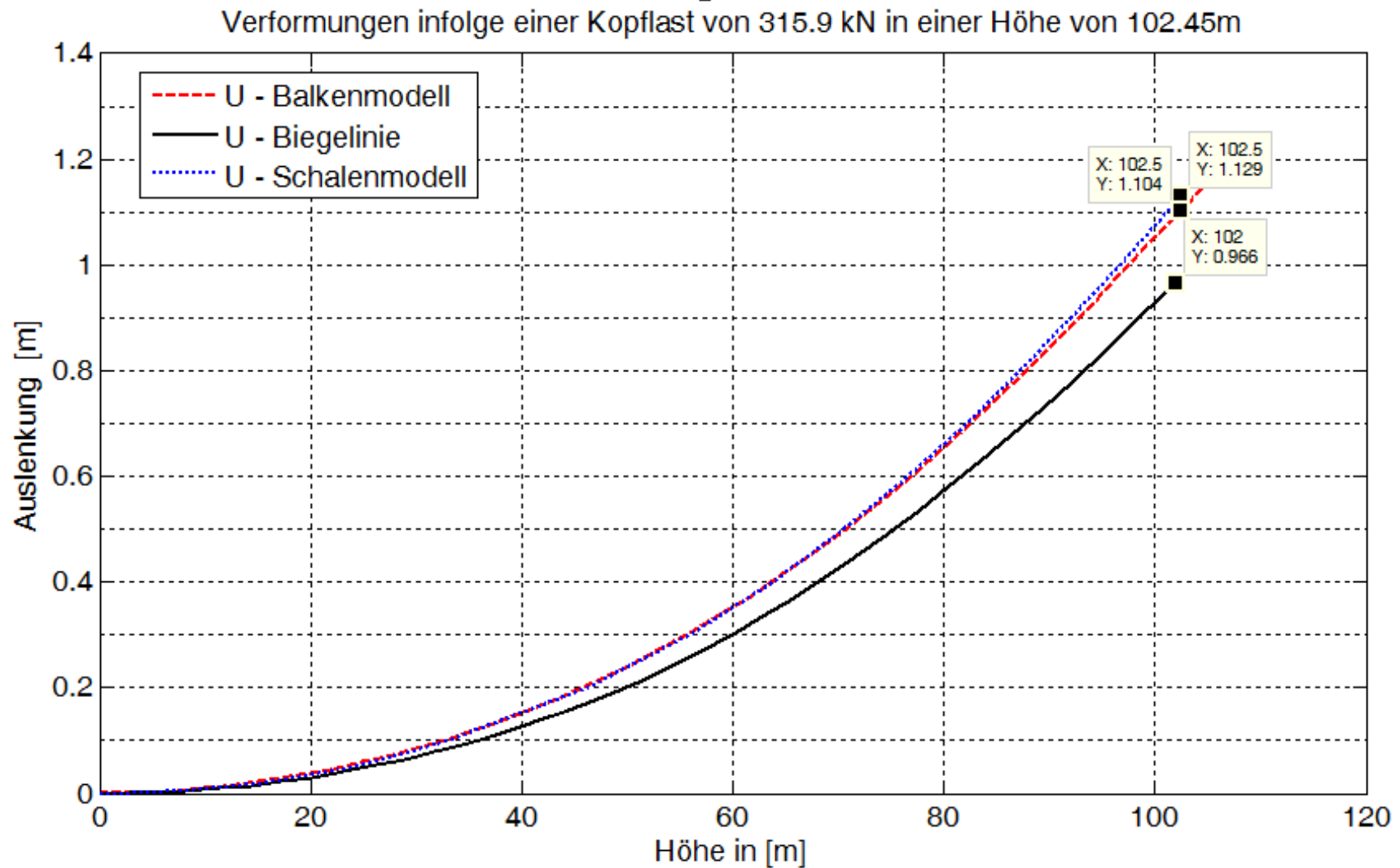
- Diskrete Werte der Verschiebung aus GPS-Messung, u_{GPS} , als Randbedingung in FE-Modell
- Bestimmung des Dehnungs-zustands des gesamten Turmes durch FE-Analyse
- Funktionaler Zusammenhang K_ε zwischen Einzelergebnissen:

$$u(t) \rightarrow \varepsilon(t_i) = K_\varepsilon \cdot u_{GPS}(t_i)$$
- Endergebnis: Vergleich der Dehnungen in Bodenebene aus FE-Analyse mit Ergebnis aus Dehnungsmessung

Ergebnis: Vergleich der Dehnungen



Ergebnis: Vergleich der Auslenkung



- ❑ Zur Überwachung von Onshore-WEA ist das GPS durch Verwendung eines festen Referenzpunktes ausreichend genau
- ❑ Für eine Anwendung im Offshore-Bereich muss eine Lösung für einen Referenzpunkt gefunden werden
- ❑ Derzeit ist die Anwendung für Windparks noch unwirtschaftlich
- ❑ Die Auswertung der Messdaten müsste noch automatisiert werden (derzeit läuft Messdatenauswertung offline)

Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit!