

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



**10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik
KT2012 | Residenzschloss Dresden | 14.–15. Juni 2012**

Stelzer · Grote · Brökel · Rieg · Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

Entwickeln – Entwerfen – Erleben.
Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung
10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)
Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)
Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)
Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei
ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

ma design
//ENGINEERING

Continental 

B.I.M.
consulting

TEDATA

xPLM
Solution

REISS

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 987-3-942710-80-0

© 2012 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Gunter Sanow, Oliver Erne & Hagen Berger

Optische 3D-Messtechnik zur Schwingungsanalyse an Windkraftanlagen

1 Einleitung

Der Anteil erneuerbaren Energien in der Energieversorgung soll auch in den kommenden Jahren weiter ausgebaut werden. Dadurch steigt der Bedarf an großen und effizienten Windkraftanlagen (WKA) mit immer höheren Anforderungen an Materialien und Strukturen. Die hohen Belastungen und limitierenden Faktoren in Bezug auf die Lebensdauer solcher Anlagen sind meist dynamisch und abhängig von Strukturschwingungen und Belastungsanregung. Hierzu werden vermehrt Simulationstechniken eingesetzt, die in der Praxis durch den Mangel an genauen Randbedingungen unpräzise sind bzw. als Modell durch Messungen validiert werden müssen. Während typischerweise zur Erfassung von Schwingwegen Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt werden, gestaltet sich die Implementierung solcher Messtechnik in drehenden Strukturen meist komplex und aufwändig (Ozbek et al. 2010). Der Einsatz optischer Messtechnik ist im Vergleich einfacher und kann potentiell die Optimierung von Simulationsmodellen unterstützen (Ozbek et al. 2010, Schmidt-Paulsen et al. 2009, 2011).

Die optische Messtechnik wird im Folgenden an Beispielen aufgezeigt. Ergebnisse dieser Projekte wurden in Teilen schon veröffentlicht.

2 Optische 3D-Messtechnik

Das PONTOS System (siehe Abbildung 1) der Fa. GOM wurde in den vorliegenden Applikationsbeispielen eingesetzt. Basierend auf dem Prinzip des kalibrierten Stereokameraaufbaus bestimmt das System 3D-Koordinaten anhand von aufgeklebten Messmarken (Erne et al. 2005). Die Berechnung der 3D-Koordinaten erfolgt in der PONTOS Software automatisch. Mit einer zeitlich getriggerten Bildaufnahme können nun zu jedem Zeitpunkt die Ortskoordinaten und über einen Zeitraum Bewegungen und Objektverformungen präzise bestimmt werden. Durch den Einsatz diverser Kameraauflösungen mit typ. 1,3 bis 12 Megapixel und möglichen Aufnahmefrequenzen bis typ. 500 Hz kann das System flexibel an verschiedene Applikationen angepasst werden. Die Beleuchtung erfolgt bei höheren Aufnahmefre-

Abbildung 1: PONTOS System mit Sensor und Auswertestation

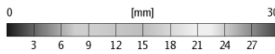
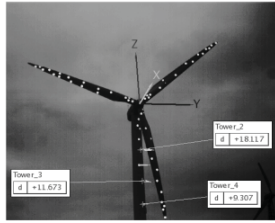


quenzen mit synchron zur Kamera angesteuerten LEDs, welche in Verbindung mit retroreflektiven Markermaterialien auch bei sehr großen Messvolumen zu einer optimalen Ausleuchtung des Messfeldes und sehr kurzen Belichtungszeiten führt. Die kurzen Belichtungszeiten sind insbesondere bei der Erfassung von schnellen Objektbewegungen zur Vermeidung von Bewegungsunschärfen zu beachten. Die Anpassung auf das Messfeld erfolgt über den Abstand des Systems zum Objekt, den Abstand zwischen den Kameras und den Einsatz von Messobjektiven mit diversen Brennweiten. Typische Messfeldgrößen reichen von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ bis ca. $100 \times 100 \text{ m}^2$. Die Messergebnisse können grafisch überlagert auf den aufgenommenen Bildern dargestellt oder über entsprechende Schnittstellen Systemen zur weiteren Schwingungsanalyse zugeführt werden.

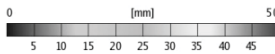
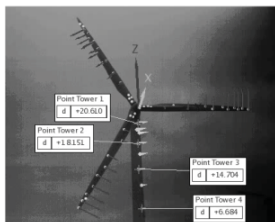
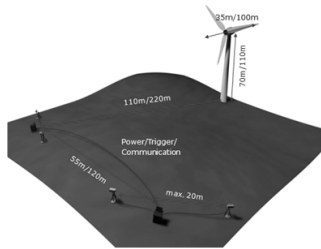
3 Erfassung der Turmbewegung im Not-Stop

Die Belastungen auf eine WKA sind während des Not-Stops extrem und sollten erfasst werden. So wurden die Schwingform und Schwingamplitude an einer WKA mit ca. 40m Durchmesser während eines Not-Stopp Programms durchgeführt. Hierzu wurden Messmarken basierend auf retroreflektierendem Material an Turm und Rotorblätter aufgebracht. Die Kameras und Beleuchtung wurden im Feld auf der Luvseite so positioniert, dass der komplette Rotor im Blickfeld beider Kameras erschien (siehe Abbildung 2). Die Anlage wurde betrieben und im Not-Stop-Betrieb abgebremst. Dabei wird Rotor der WKA mit einer Bremse abgebremst. Die ermittelten 3D-Koordinaten, welche mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet wurden, konnten mit Hilfe der PONTOS Software in das Bauteilkoordinatensystem transformiert und in Verschiebungswerte umgerechnet werden. In den Abbildungen 3 und 4 sind jeweils die Ergebnisse zweier Messreihen dargestellt. Abbildung 3 beschreibt die Bewegung des Turms der WKA bei der Einleitung des Bremsvorgangs, während Abbildung 4 die Bewegung in der Endphase des Vorgangs, direkt nach Stillstand des Rotors zeigt. Am Anfang der Bremsung treten durch das eingeleitete Moment im Kopf des Turmes laterale Auslenkungen im Bereich um 20–30 mm auf, wobei die laterale Auslenkung nach Stillstand des Rotors erheblich größer ist. Aufgrund partieller Abdeckungen der Messmarken

**Emergency Stop
Tower Deformation**



Deformation (Vector)
embrake_start_14_trajectories.dyn
Date: 18.12.2007
Stage 559



Deformation (Vector)
embrake_stop.dyn
Date: 18.12.2007
Stage 1

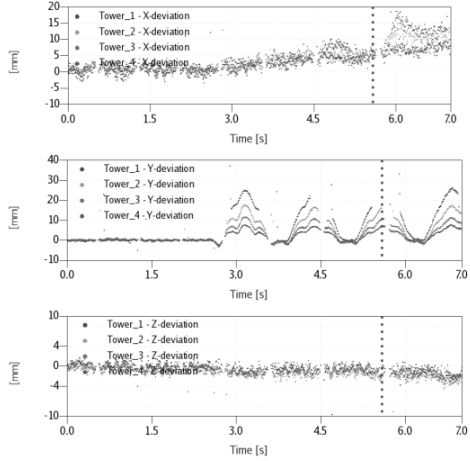
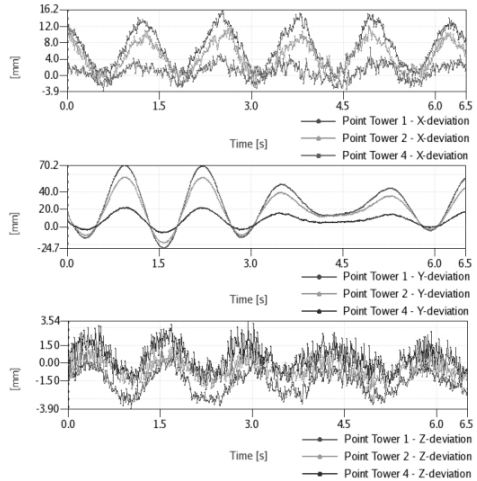


Abbildung 2 (oben): Aufbau der optischen Messanlage vor der WKA

Abbildung 3 (links): Turmbewegung in der Anfangsphase der Not-Stop-Bremung

Abbildung 4 (unten): Turmbewegung in der Endphase (nach Stillstand) der Not-Stop-Bremung



auf dem Turm durch die Rotorblätter treten in der Messreihe Zeiten ohne Messwert auf. In Abbildung 4 ist im Diagramm bei ca. 4,5s nach Start der zweiten Messreihe ein deutlicher nicht harmonischer Einfluss zu sehen, welcher auf Kopplungseffekte zwischen Rotor- und Turmschwingung zurückzuführen ist.

4 Schwingformermittlung an einem Rotorblatt

Ein 3,5 m langes Rotorblatt einer kleinen WKA wurde einer Schwingungsanalyse unterzogen. Hierzu wurde das Rotorblatt über Bänder horizontal in einer möglichst »frei-freien« Aufhängung positioniert. Zur Anregung diente ein Shaker, der über einen biegeweichen Draht am Rotorblatt befestigt wurde. Das Rotorblatt wurde einseitig mit 50 Messmarken versehen und ein PONTOS System vor das Messobjekt positioniert. Anschließend wurde das Rotorblatt mit einem Frequenzsweep zwischen 3 und 100 Hz angeregt. Aus der simultanen Erfassung aller Messmarken wurde die out-of-plane Bewegung (flapwise) extrahiert und die Verschiebungsergebnisse einer FFT-Analyse unterzogen. Die FFT-Analyse (siehe Abbildung 5) zeigt deutliche Resonanzfrequenzen, welche nachträglich nochmals einzeln angeregt und gemessen wurden. Die Ergebnisse der Einzelmessungen zur Analyse der Schwingformen sind beispielhaft in Abbildung 6 und 7 dargestellt. Während bei ca. 15 Hz (Abbildung 6) eine reine Biegeschwingung auftrat ist in Abbildung 7 bei ca. 72 Hz eine überlagerte Biege und Torsionsschwingung zu sehen.

5 Erfassung von Betriebsschwingformen an einer WKA

Zur Bestimmung von Betriebsschwingformen an einer kommerziellen WKA mit ca. 80 m Nabhöhe und Rotordurchmesser wurde das PONTOS System eingesetzt. Zuerst wurden ca. 50 Messmarken auf dem Turm und den Rotorblättern der WKA angebracht. Die Installation der Messmarken benötigte ca. sechs Stunden für zwei professionelle Industriekletterer (siehe Abbildung 7). Das PONTOS System wurde auf der Luv-Seite im Feld vor der WKA positioniert und die Kameras auf den Rotor ausgerichtet (siehe Abbildung 2). Die darauffolgenden Messungen wurden in Abend- und Nachtstunden bei normalen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Abtastrate

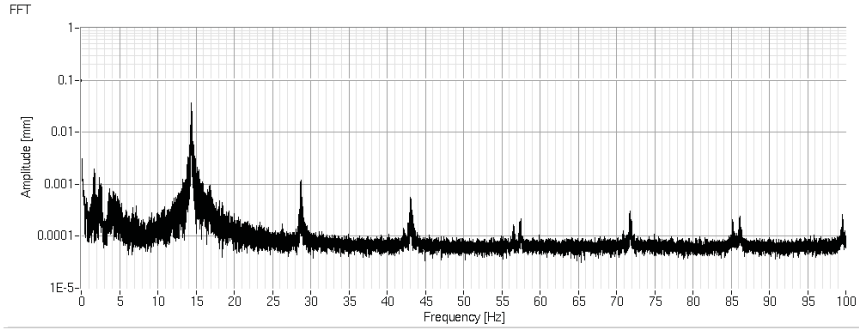


Abbildung 5: FFT Analyse eines 3,5 m Rotorblatts im Frequenzbereich 3-100 Hz

Abbildung 6:
Eigenschwingform bei ca. 15 Hz
(Biegeschwingung, flapwise)

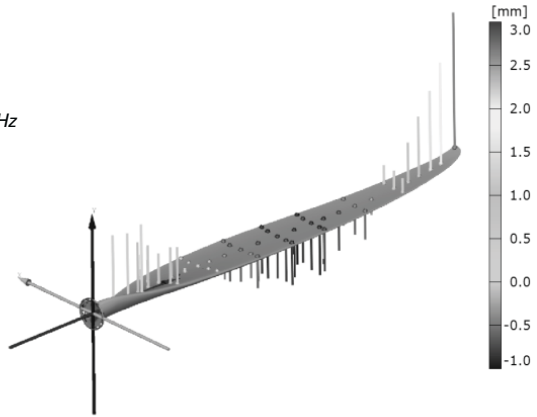
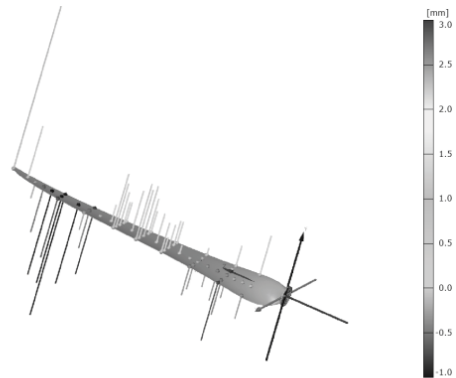


Abbildung 7:
Eigenschwingform bei ca. 72 Hz
(überlagerte Biege- und
Torsionsschwingung)



für die Kameras betrug 25 Hz. Die 3D Verschiebung an jeder der ca. 50 Messmarken wurde ausgewertet. Anschließend wurde eine Starrkörperkompensation auf den Rotor berechnet um die später zu berechnenden Schwingformen einfacher zu extrahieren. Die Frequenzanalyse und Berechnung der einzelnen Schwingformen im Betrieb wurde mittels handelsüblicher Schwingungsanalysesoftware durchgeführt. Die Ergebnisse ausgewählter Schwingformen sind in Abbildung 8 dargestellt.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurden Messungen für diverse Applikationen für WKA mit Hilfe optischer 3D Messtechnik durchgeführt. Die Beispiele zeigen, dass sich die optische Messtechnik zur Verformungs- und Schwingungsanalyse eignet. Die detaillierten Schwingungsauswertungen können mit den Daten der optischen Messtechnik unter Zuhilfenahme von handelsüblicher Schwingungsanalysesoftware durchgeführt werden. Ein großer Vorteil der Messtechnik ist es, dass die eingesetzten »Messaufnehmer«, also die Punktmarken einfach an den Objekten anbringen lassen und keine aufwändigen Referenzrahmen, Kabel etc. installiert werden müssen. Auch, wie in diesen Fällen, können die Marken an aerodynamisch belasteten Bauteilen eingesetzt werden, ohne die Bauteile zu verändern. Besonderes Augenmerk liegt hier auch auf den im Vergleich zu Schwingungsaufnehmern nahezu masselosen »Messaufnehmer«, die selbst in großen Stückzahlen auf leichten Strukturen keine Rückwirkungen auf die dynamischen Eigenschaften befürchten lassen. Begrenzend ist hier die nötige Sichtbarkeit der Messmarken anzumerken, welche z.B. durch partielle Abdeckung einen kurzen Ausfall der Messwerte zur Folge hat. Dagegen ist die Anzahl der Messmarken im Bildfeld prinzipiell unbegrenzt, sodass in der Praxis typischerweise einige Marken zusätzlich eingesetzt werden, um einen kurzfristige Abdeckung auszugleichen. Die Messtechnik lässt sich wie gezeigt für verschiedene Applikationen bei unterschiedlich großen Messbereichen und diversen Abstraten anpassen und einsetzen. Die Messgenauigkeit ist hier auch von der Größe des Messbereichs abhängig und wurde im Bezug auf die Applikation in Windkraftanlagen diskutiert (Ozbek et al. 2010). Die einfach zu installierende hohe Anzahl der Messstellen

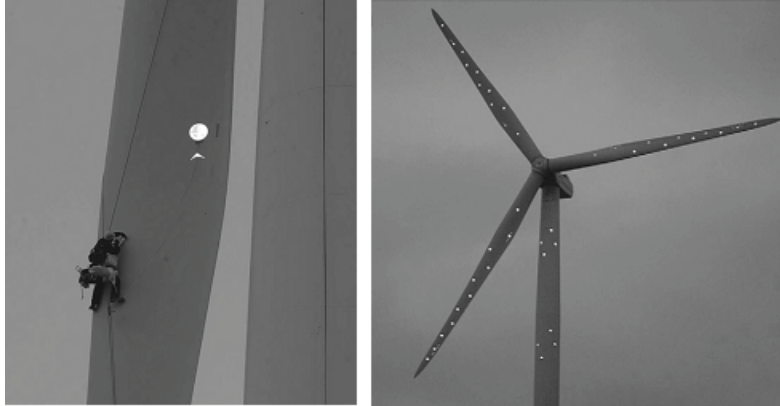


Abbildung 8: Installation der ca. 50 Messmarken durch Industriekletterer; fertig bestückte WKA

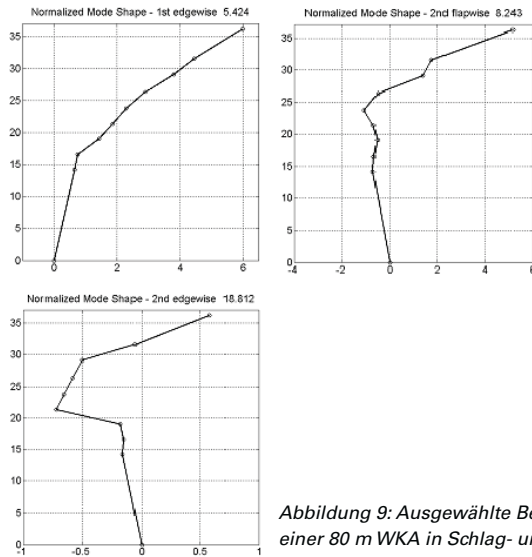


Abbildung 9: Ausgewählte Betriebsschwingformen einer 80 m WKA in Schlag- und Schwenkrichtung

für gleichzeitige 3D-Koordinaten als auch Verschiebungsmessung legt den Vergleich und die Optimierung von Rechenmodellen nahe (Brinkmann et al. 2007, Behrens et al.2010).

Literaturverzeichnis

- Behrens, B.-A., Bouguecha, A., Czora, M., Krimm, R., Matthias, T., Salfeld, V. (2010): Consideration of Machine Properties in FE Analysis of Sheet Metal Forming Processes; Proceedings, 2nd International Conference on Process Machine Interactions, Vancouver: University of British Columbia.
- Brinkmann, C., Haberland, J., Böttinger, S., Erne, O., Sanow, G. (2007): Optical 3D Measuring System for Investigating Tyre Deformations. Landtechnik, H12772, 62. Jahrgang, S. 326–327
- Erne, O., Friebe, H., Galanulis, K. (2005): Ist konventionelle Weg- und Beschleunigungssensorik ersetzbar? Lösungsansätze mit Hilfe von optischer 3D-Messtechnik. Ullrich, P.: Fahrzeugversuch Methoden und Verfahren. Expert Verlag.
- Ozbek, M., Rixen, D., Erne, O., Sanow, G. (2010): Feasability of monitoring large wind turbines using photogrammetry, Energy 35 (2010) 4802–4811, Elsevier
- Schmidt-Paulsen, Erne, O., Sanow, G., Möller, T., Schmidt, T. (2009): Wind turbine operational and Emergency stop measurements using point tracking videogrammetry. SEM Paper
- Schmidt Paulsen, U., Erne, O., Schmidt, T., (2011): Developments in large wind turbine modal analysis using point tracking video-grammetry. Structural Dynamics and Renewable Energy. S. 187–198, Society for Experimental Mechanics

Kontakt

Dipl.-Ing. Gunter Sanow
 Dipl.-Ing. Oliver Erne, M.Sc. (PSU)
 Dipl.-Ing. Hagen Berger
 GOM mbH
 Mittelweg 7–8
 38106 Braunschweig
www.gom.com

