

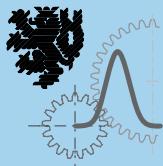
Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 433

Vera Schorbach, M. Eng.,
Hamburg

Pendelendanschläge bei Zweiblatt-Windenergie- anlagen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des
Lehrstuhl für Konstruktion
an der Bergischen Universität Wuppertal

Pendelendanschläge bei Zweiblatt-Windenergieanlagen

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades
(Dr.-Ing.)**

im
**Fachbereich D - Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,
Sicherheitstechnik**
der
Bergischen Universität Wuppertal

- Abteilung Maschinenbau -

vorgelegt von
Vera Schorbach
aus Volkmarsen

Wuppertal 2015

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing Peter Gust (Bergische Universität Wuppertal)
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing Po Wen Cheng (Universität Stuttgart)

Tag der mündlichen Prüfung: 4.12.2015

Fortschritt-Berichte VDI

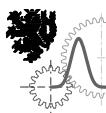
Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Vera Schorbach, M. Eng.,
Hamburg

Nr. 433

Pendelendanschläge bei
Zweiblatt-Windenergie-
anlagen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des
Lehrstuhls für Konstruktion
an der Bergischen Universität Wuppertal

Schorbach, Vera

Pendelendanschläge bei Zweiblatt-Windenergieanlagen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 433. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

198 Seiten, 80 Bilder, 35 Tabellen.

ISBN 978-3-18-343301-8, ISSN 0178-949X,

€ 71,00/VDI-Mitgliederpreis € 63,90.

Für die Dokumentation: Windenergie – Zweiblattanlagen – Pendelhaben – Pendelendanschläge – Lastsimulation

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure aus dem Bereich der Windenergie. Sie befasst sich mit Zweiblattanlagen mit Pendelhabe.

Pendelhaben gelten in der Windenergie trotz ihrer positiven Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeitslasten als weniger zu favorisierende Anlagenkonzepte, weil in Extremsituationen große Kräfte entstehen können. Diese entstehen durch das Treffen des Pendelendanschlags.

Die Arbeit befasst im Detail mit dem Konzeptdesign von Zweiblattanlagen mit dem Ziel, die Extremlasten durch Pendelendanschläge zu reduzieren und zeigt auf, wie Pendelhaben last-optimiert ausgelegt werden können.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin der HAW Hamburg verfasst. Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei allen bedanken, die mich auf unterschiedlichste Weise unterstützt haben. Ganz besonders gilt dies für Herrn Prof. Peter Dalhoff von der HAW Hamburg. Ebenso gilt mein Dank natürlich meinem Doktorvater Prof. Dr. Peter Gust von der Bergischen Universität Wuppertal sowie Herrn Prof. Dr. Po Wen Cheng von der Universität Stuttgart für die Übernahme des Koreferats.

Auch die Förderung durch Pro Exzellenzia Hamburg mit einem Stipendium während des ersten Jahres möchte ich an dieser Stelle erwähnen.

Außerdem bedanke ich mich bei der Firma DNVGL, die mich mit einer Forschungslizenz der Software Bladed unterstützt hat.

Eine besondere Ehre war mir die Unterstützung des großen Wind-Pioniers Sönke Siegfriedsen. Vielen Dank auch an die Mitarbeiter der Firma aerodyn, insbesondere an Jan-Christoph Hinrichs.

Sehr viele Experten aus der Windenergie haben sich im Verlauf der Arbeit Zeit für meine Fragen genommen. Hier bedanke ich mich bei Erich Hau, Ervin Bossanyi, Andrew Garrad, James Manwell, Peter Jamieson, Dietmar Knünz, Siegfried Helm, Franz Mitsch, Taesong Kim, Reinhard Schleefelmann, Christian Nath, Kimon Argyriadis und Alan Wright. Ganz besonders bedanke ich mich bei Roger Haines, der sich über Jahre hinweg immer wieder Zeit für konstruktive wissenschaftliche Diskussionen genommen hat.

Nicht zu vergessen sind die zahlreichen Angehörigen der HAW Hamburg, die mich auf unterschiedlichste Weise unterstützt und motiviert haben. Dazu zählen Prof. Dr. Jochen Kreutzfeldt, Prof. Dr. Helmut Horn, Andreas Theel, Prof. Dr. Peter Wulf, Prof. Dr. Uli Stein, Dietmar Ladewich, Prof. Dr. Hans-Joachim Beyer, Prof. Dr. Frank Ihlenburg, Prof. Dr. Thomas Netzel, Christiane Prochnow-Zahir, Prof. Dr. Thorsten Struckmann, Prof. Dr. Anna Usbeck, Prof. Dr. Thomas Veeser, Prof. Dr. Franz Vinnemeier, Elena Nitze, Prof. Dr. Zita Schillmöller, Dr. Johannes Hinckeldeyn, Dr. Patrick Diffo, Carsten Hansen, Torben Carstensen, Thes Rauert, Jenni Herrmann, Jörg Schwieger und Moo-Gyn Kim.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner langjährigen Arbeitskollegin Silke Bosler bedanken. Sie hat mich in der schwierigen Anfangsphase (keine Finanzierung, keine Arbeit aber viel Tatendrang...) bestärkt, dieses Vorhaben zu wagen. Diese Arbeit habe ich ihr gewidmet.

Hamburg, im Februar 2016

Vera Schorbach

für Silke

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	IX
Zusammenfassung	XII
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Einführung in Zweiblatt-Windenergieanlagen	6
2.1 Zweiblattanlagen: Motivation und Herausforderungen	6
2.1.1 Motivation zum Einsatz Zweiblattanlagen	6
2.1.2 Dynamische Herausforderungen von Zweiblattanlagen	7
2.2 Lastreduzierungskonzepte von Zweiblattanlagen	9
2.2.1 Möglichkeiten zur Lastreduzierung von Zweiblattanlagen	9
2.2.2 Lastreduzierungskonzepte am Beispiel bestehender Zweiblattanlagen	10
3 Literaturrecherche zu Zweiblatt-Pendelanlagen	12
3.1 Narrativer Teil der Recherche	12
3.2 Vorgehen bei der systematischen Literaturrecherche	14
3.3 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche	15
3.4 Fazit der Literaturrecherche zu Pendelanschlügen	18
4 Grundlagen der Lastsimulation von Windenergieanlagen	20
4.1 Allgemeine Modellbildung von Windenergieanlagen	20
4.2 Möglichkeiten zur Modellierung der Aerodynamik	21
4.2.1 Die Blattelementmethode und ihre empirischen Erweiterungen	21
4.2.2 CFD	24
4.2.3 Free Wake Vortex Modelle (FVM)	24
4.3 Strukturdynamische Modellierung von Windenergieanlagen	25
4.3.1 Modaler Ansatz	25
4.3.2 FEM	26
4.4 Modellierung von turbulentem Wind	26
5 Mechanische Grundlagen von Pendelnaben	28

5.1	Kreiselwirkung der Pendelnabe	28
5.2	Bewegungsgleichung des Pendelrotors	29
5.2.1	Vereinfachte Betrachtung ohne Dämpfung und äußere Anregung	30
5.2.2	Möglichkeiten zur Blattwinkelrücksteuerung	32
5.2.3	Vollständige Bewegungsgleichung des Pendelrotors	35
5.2.4	Berechnung der Größenverhältnisse am Beispiel der CART2	44
5.2.5	Energie des Pendelrotors	46
5.2.6	Pendelwinkelbetrachtung	47
6	Methodisches Vorgehen	49
7	Beschreibung der Windenergieanlagen und Ermittlung kritischer Lastfälle	52
7.1	Beschreibung der Windenergieanlagen	52
7.1.1	CART2	52
7.1.2	SCD3MW	53
7.1.3	Gegenüberstellung CART2 - SCD3MW	53
7.2	Numerische Ermittlung kritischer Lastfälle für Pendelendanschläge	56
7.2.1	Auswahl der Lastannahmen für die Ermittlung von Pendelendanschlägen	56
7.2.2	Auswahl Simulationsprogramm	57
7.2.3	Modellbildung der CART2 und SCD3MW	58
7.2.4	Validierung der Simulationsmodelle	59
7.2.5	Lastfallsimulation der CART2 und SCD3MW	66
7.2.6	Ergebnisse der Lastfallsimulation der CART2	67
7.2.7	Ergebnisse der Lastfallsimulation der SCD3MW	68
7.2.8	Gegenüberstellung der Ergebnisse der CART2 und SCD3MW	72
7.2.9	Fazit der Lastfallsimulationen von CART2 und SCD3MW	74
8	Analyse von Endanschlägen anhand der Simulationsergebnisse der CART2	75
8.1	Energiebetrachtung und Pendelwinkelverlauf verschiedener Endanschlagslastfälle	75
8.2	Fazit der Analyse unterschiedlicher Endanschlagssituationen	79
8.3	Konstruktive Aspekte der Analyse unterschiedlicher Endanschlagssituationen	81
8.4	Auswahlkriterien für die betrachteten Endanschlagssituationen	82
9	Dimensionsanalyse des Pendelendanschlags	85
9.1	Analytische Beschreibung des Pendelendanschlags	85
9.2	Verfahren der Dimensionsanalyse	87
9.3	Methode der Differentialgleichung am Beispiel der Bewegungsgleichung ohne Endanschlag	88
9.4	Methode der Differentialgleichung mit der erweiterten Endanschlagsgleichung	89
9.5	Kennzahlenvergleich bestehender Pendelanlagen	92
10	Einfaktorielle Kennzahlvariation der CART2 und SCD3MW	95
10.1	Simulationsplanung und -vorbereitung	95
10.1.1	Parameterauswahl für Variation der Kennzahlen	95

10.1.2	Überprüfung der notwendigen Anzahl an Simulationen pro Parametervariation	97
10.1.3	Anpassung der Modelle	99
10.2	Einfaktorielle Kennzahlvariation	100
10.2.1	Kennzahl K1: Lock-Zahl	100
10.2.2	Kennzahl K2	101
10.2.3	Kennzahl K3	101
10.2.4	Kennzahl K4	102
10.2.5	Kennzahl K6	103
10.2.6	Ergebnisse der einfaktoriellen Kennzahlvariationen	103
11	Prüfung der Kennzahlen bei Kennzahl-Gleichheit beider Anlagen	107
11.1	Umbau der SCD3MW zu CART2-Kennzahlen	107
11.2	Gegenüberstellung des Kennzahlverhaltens bei Kennzahl-Gleichheit	107
12	Multifaktorielle Kennzahlvariation der CART2	110
12.1	Versuchsplan	110
12.2	Ergebnisse der multifaktoriellen Kennzahlvariation	112
12.3	Grafische Darstellung der Ergebnisse	115
12.4	Einfluss des freien und maximalen Pendelwinkels auf die Kennzahl K3	116
12.5	Grenzen der Ergebnisse des multifaktoriellen Versuchsplans	118
13	Auswirkungen der Kennzahlen auf alle Extremlasten der CART2 und SCD3MW	119
13.1	Anlagenauslegung	119
13.2	Ergebnisse	120
13.3	Auswirkungen auf den Ertrag und Betrachtung der Toleranzen der Pendelparameter	123
14	Zusammenfassung der Arbeit und Ausblick	125
14.1	Pendelendanschläge im Allgemeinen	125
14.1.1	Relevanz der Forschungsfrage	125
14.1.2	Kategorien von Endanschlägen	125
14.1.3	Größenordnung des Endanschlags	126
14.2	Bedeutung der Kennzahlen für die Intensität des Endanschlags	127
14.2.1	Überblick Kennzahlen	127
14.2.2	Auswirkung einzelner Kennzahlen auf die Intensität von Pendelendanschlägen	128
14.2.3	Lastreduzierende Kennzahlkombinationen	129
14.2.4	Ergebnisse im Hinblick auf Auslegungen bestehender und historischer Zweiblattanlagen	130
14.3	Zusammenfassung konstruktiver Erkenntnisse	130
14.3.1	Feder und Dämpfer des Endanschlags	130
14.3.2	Extremlasten - Betriebslasten: Größe des freien und maximalen Pendelwinkels	131
14.3.3	Energie des Rotors	132

14.3.4 Pendelbremse	132
14.3.5 Regelungseinflüsse	133
14.4 Ausblick	133
A Anhang	137
A.1 Koordinatensysteme	137
A.2 Konstruktionsbeispiele für Pendelnaben	142
A.3 Konstruktionsbeispiele für Pendelbremsen	143
A.4 Ergänzungen zur Aerodynamik	144
A.4.1 2D-Aerodynamik	144
A.4.2 BEM-Methode	146
A.4.3 Turbulenzen	149
A.5 Campbell-Diagramm	153
A.6 Vergleich der IEC-Simulation von CART2 und SCD3MW	155
A.7 Grafiken zur Kategorisierung von Pendelendanschlägen	155
A.8 Berechnung der Kennzahlen bestehender und früherer Anlagen	159
A.9 Grafiken des Kennzahlverhaltens bei Kennzahl-Gleichheit	162
A.10 Ergebnisse der Simulationsplanung und -vorbereitung	167
A.11 Multifaktorielle Simulation der CART2	173
Literatur	178

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

a	axialer Induktionsfaktor [-]
a'	tangentialer Induktionsfaktor [-]
B	Anzahl der Blätter [-]
c	Blattsehnenlänge [m]
C_a	aerodynamische Dämpfung [Nms/rad]
C_l	Auftriebsbeiwert [-]
C_{la}	Steigung der Auftriebskurve [-]
C_d	Widerstandsbeiwert [-]
C_T	Schubbeiwert [-]
C_M	Momentenbeiwert [-]
C_N	Dämpfung des Endanschlags in der Nabe [Nms/rad]
C_{pt}	Pitch-Pendel-Kopplungs-Koeffizient [-]
F_{zf}	Zentrifugalkraft [N]
F_A	Auftriebskraft [N]
F_S	Schubkraft [N]
F_V	Vortriebskraft [N]
F_W	Widerstandskraft [N]
h	Höhe über Grund [m]
J	Massenträgheitsmoment des Rotors um y-Achse [kgm ²]
k	Lineare Steigung des Höhenwindgradienten [-]
k_{zf}	Steifigkeit durch Zentrifugalwirkung [Nm/rad]
k_N	Steifigkeit des Endanschlags in der Nabe [Nm/rad]
k_a	aerodynamische Steifigkeit durch Pitch-Pendel-Kopplung [Nm/rad]
$K..$	dimensionslose Kennzahl [-]
L_k	Längenparameter der Turbulenzrichtung [m]
M_{EA}	Endanschlagsmoment um y-Achse [Nm]
M_a	durch Aerodynamik verursachte Momente um y-Achse [Nm]
M_{zf}	durch Zentrifugalkraft verursachtes Moment um y-Achse [Nm]
M_J	durch Massenträgheit verursachtes Moment um y-Achse [Nm]
M_y	Nabenbiegemoment um y-Achse [Nm]
p_T	Kräfte in Schwenkrichtung pro Längeneinheit [N/m]
p_N	Kräfte in Schlagrichtung pro Längeneinheit [N/m]
R	Rotorradius [m]
Re	Reynoldszahl [-]

r	lokaler Blattradius [m]
S	Kreuzspektrum [-]
T	Periodendauer [Hz]
u	Windgeschwindigkeit [m/s]
u_∞	ungebremste Windgeschwindigkeit vor Rotor [m/s]
\bar{U}	Mittlere Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe [m/s]
v	Anströmgeschwindigkeit des Profils [m/s]
W_{kin}	kinetische Energie des Pendelrotors in Pendelrichtung [J]
W_{pot}	potentielle Energie des Pendelrotors in Pendelrichtung [J]
W_{Pendel}	Energie der Pendelbewegung [J]

Griechische Buchstaben

α	Anstellwinkel [°]
γ	Lock-Zahl [-]
δ_3	Winkel zwischen der mechanischen Pendelachse und der y-Achse der Nabe [°]
ζ	Pendelwinkel [°]
ζ_{frei}	freier Pendelwinkel [°]
ζ_{max}	maximaler Pendelwinkel [°]
ζ_{EA}	Endanschlagswinkel [°]
ζ^*	Amplitude des Pendelwinkels bei stetigem Wind [°]
φ	Winkel bei Drehschwingung [°]
Θ	Pitchwinkel [°]
ν	kinematische Viskosität [m^2/s]
ξ	Lehrsches Dämpfungsmaß [-]
ϕ	Anströmwinkel [°]
ρ	Luftdichte [kg/m^3]
λ	Schnelllaufzahl [-]
σ_r	Blattüberdeckungsgrad [-]
σ_u	Standardabweichung des turbulenten Windes [m/s]
Ω	Rotordrehfrequenz [min^{-1}]
ω_D	gedämpfte Eigenfrequenz [Hz]
ω_0	ungedämpfte Eigenfrequenz [Hz]

Abkürzungen

BEM	Blade Element Momentum Theory
CFD	Computational Fluid Dynamics
DLC	Design Load Case
ECD	Extreme Coherent Gust with Direction Change
EDC	Extreme Direction Change
EOG	Extreme Operation Gust
EWM	Extreme Wind Speed Model
EWS	Extreme Wind Shear
FEM	Finite Element Methode
FFT	Fast Fourier Transform
FVM	Free Wake Vortex Methode
IEC	International Electrotechnical Commission
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NTM	Normal Turbulence Model
NWP	Normal Wind Profile
SCD	Super Compact Drive

Zusammenfassung

Pendelendanschläge bei Zweiblatt-Windenergieanlagen

Zweiblatt-Windenergieanlagen gelten als ein möglicher Anlagentyp für den Offshore-Einsatz, weil sie das Potential bieten, Kosten zu reduzieren. Allerdings sind die dynamischen Belastungen einer Zweiblattanlage im Vergleich zu einer Dreiblattanlage durch deren symmetrischen Rotor komplexer. Eine mögliche Lösung für den Umgang mit dieser Dynamik besteht in der Verwendung einer Pendelnabe, die die auf die Anlage wirkenden Kräfte und Momente unter normalen Betriebsbedingungen erheblich reduzieren kann. Pendelnaben werden in der Literatur häufig hinsichtlich ihrer positiven Wirkung auf die Betriebslasten erwähnt, jedoch wird zeitgleich fast immer darauf verwiesen, dass durch die konstruktiv zwingend erforderliche Begrenzung des Pendelns (den Pendelendanschlag) große Lasten entstehen, die die Vorteile von reduzierten Betriebslasten wieder zunichte machen würden. Konkrete Angaben über die Größenordnung der zu erwartenden Lasten durch Pendelendanschläge oder auch Hinweise zu einer geeigneten Auslegung der Pendelparameter bleiben jedoch unbeantwortet.

Um diesen Sachverhalt genauer zu untersuchen, werden in der vorliegenden Arbeit folgende Forschungsfragen untersucht: welche Situationen führen zu Pendelendanschlägen, welche Parameter bieten gute Möglichkeiten, deren Intensität zu reduzieren und gibt es Kennzahlen, um anlagenübergreifend die Intensität und damit auch die Auslegung des Pendelendanschlags beschreiben zu können?

Die Methodik dieser Arbeit besteht dabei in einer Kombination aus analytischer Betrachtung der mechanischen Grundlagen der Pendelnabe und aeroelastischen Simulationen von Extremlastfällen der beiden Zweiblattanlagen CART2 (600 kW) und SCD3MW (3 MW). Fünf dimensionslose Kennzahlen zur Beschreibung des Nabengeometriemoments durch Pendelendanschläge werden im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt. Da sich die Kennzahlen weitestgehend anlagenunabhängig verhalten, werden durch sie Vergleiche zwischen verschiedenen Pendelnaben hinsichtlich der Intensität der zu erwartenden Pendelendanschläge ermöglicht. Anhand verschiedener Kennzahl-Kombinationen wird zudem gezeigt, dass eine Pendelnabe so ausgelegt werden kann, dass ihre Extremlasten weit unter denen einer starren Zweiblattanlage liegen. Allerdings kann die Auslegung auch so erfolgen, dass die Lasten durch Pendelendanschläge die Extremlasten einer starren Nabe bei weitem übersteigen.

Zusammenfassend werden mit dieser Arbeit neue und wichtige Erkenntnisse über Zweiblatt-Pendelnaben aufgezeigt. Der Schluss liegt nahe, dass dieser Anlagentyp durchaus für zukünftige Windenergieanlagen in Betracht gezogen werden sollte.

Abstract

Teeter end impacts on two bladed wind turbines

Two bladed wind turbines are generally regarded as a possible alternative for application in the offshore area as they show a potential to save cost of energy. Still, in contrast to three bladed turbines, the dynamic behavior of two bladed turbines is more challenging because of the rotor's symmetry. A possible solution to handle these larger dynamic loads is the use of a teeter hinge, which can significantly reduce loads in normal operating conditions.

Scientific literature underlines the advantages of teeter hinges for fatigue loads. However, it is frequently mentioned, that the necessary restriction of the teeter movement (the teeter restraint) can lead to large loads, which make the load reducing advantage on fatigue loads of the teeter hinge obsolete. Information about the magnitude of those teeter end impacts or instructions about a suitable design of a teeter hinge must remain uncertain.

This study examines the following research questions: Which situations lead to teeter end impacts, which parameters of a teeter hinge offer possibilities to reduce the intensity of teeter end impacts, and are there dimensionless numbers to characterize the intensity of teeter end impacts independent of the turbine-size?

The methodology of this study combines the use of analytical equations of the mechanics of the teeter movement and aeroelastic simulations of extreme load cases of the two turbines CART2 (600 kW) and SCD3MW (3 MW).

As a result of this study five dimensionless numbers describing the intensity of the hub bending moment coming from the teeter end impact can be shown. As the behavior of these dimensionless numbers is mostly independent of the turbine, they allow comparisons of different teetered turbines regarding the expectable intensity of teeter end impacts. Based on different combinations of the dimensionless numbers the study is able to show that a teetered turbine can be designed in a way that its extreme loads coming from end impacts are far below the extreme loads of a rigid hub. However, it has also been shown that a teeter hinge can be designed in such a way that extreme loads of teeter end impacts become much more severe than the ones of a rigid hub.

In summary, this work shows new and important findings about teetered turbines. Consequently this type of turbine should more widely be regarded as a possibility for future wind turbines.

