

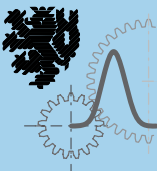
## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 433

Vera Schorbach, M. Eng.,  
Hamburg

# Pendelendanschläge bei Zweiblatt-Windenergie- anlagen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des  
**Lehrstuhls für Konstruktion**  
an der Bergischen Universität Wuppertal

<https://doi.org/10.31233/osf.io/3186433019-1>

Generiert durch IP '3.15.231.234', am 24.05.2024, 10:10:25

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.



# **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

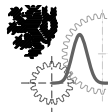
Reihe 1

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 – Pendelnaben – Pendelendanschläge – Lastsimulation

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

Pendelnaben 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 Pendelnaben lastoptimiert 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>.

D 468

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-343301-8

<https://doi.org/10.51202/9783186433015-1>

Generiert durch IP '3.15.231.234', am 24.05.2024, 10:10:25.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

---

## 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 Schleeßelmann, 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 Kreuzfeldt, 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 Netzels, Christiane Prochnow-Zahir, Prof. Dr. Thorsten Struckmann, Prof. Dr. Anna Usbeck, Prof. Dr. Thomas Veese, Prof. Dr. Franz Vinnemeier, Elena Nitze, Prof. Dr. Zita Schillmöller, Dr. Johannes Hinkeldeyn, 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

<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Hintergrund . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Einführung in Zweiblatt-Windenergieanlagen</b>	<b>6</b>
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
<b>3 Literaturrecherche zu Zweiblatt-Pendelanlagen</b>	<b>12</b>
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 Pendelendanschlägen . . . . .	18
<b>4 Grundlagen der Lastsimulation von Windenergieanlagen</b>	<b>20</b>
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
<b>5 Mechanische Grundlagen von Pendelnaben</b>	<b>28</b>

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
<b>6</b>	<b>Methodisches Vorgehen</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Beschreibung der Windenergieanlagen und Ermittlung kritischer Lastfälle</b>	<b>52</b>
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
<b>8</b>	<b>Analyse von Endanschlägen anhand der Simulationsergebnisse der CART2</b>	<b>75</b>
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
<b>9</b>	<b>Dimensionsanalyse des Pendelendanschlags</b>	<b>85</b>
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
<b>10</b>	<b>Einfaktorielle Kennzahlvariation der CART2 und SCD3MW</b>	<b>95</b>
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
<b>11</b>	<b>Prüfung der Kennzahlen bei Kennzahl-Gleichheit beider Anlagen</b>	<b>107</b>
11.1	Umbau der SCD3MW zu CART2-Kennzahlen . . . . .	107
11.2	Gegenüberstellung des Kennzahlverhaltens bei Kennzahl-Gleichheit . . . . .	107
<b>12</b>	<b>Multifaktorielle Kennzahlvariation der CART2</b>	<b>110</b>
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
<b>13</b>	<b>Auswirkungen der Kennzahlen auf alle Extremlasten der CART2 und SCD3MW</b>	<b>119</b>
13.1	Anlagenauslegung . . . . .	119
13.2	Ergebnisse . . . . .	120
13.3	Auswirkungen auf den Ertrag und Betrachtung der Toleranzen der Pendelparameter . . . . .	123
<b>14</b>	<b>Zusammenfassung der Arbeit und Ausblick</b>	<b>125</b>
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
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>137</b>
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
	<b>Literatur</b>	<b>178</b>

---

# 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 [-]
$C_{l\alpha}$	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 <sup>2</sup> ]
$k$	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]
$u_\infty$	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

$\alpha$	Anstellwinkel [°]
$\gamma$	Lock-Zahl [-]
$\delta_3$	Winkel zwischen der mechanischen Pendelachse und der y-Achse der Nabe [°]
$\zeta$	Pendelwinkel [°]
$\zeta_{frei}$	freier Pendelwinkel [°]
$\zeta_{max}$	maximaler Pendelwinkel [°]
$\zeta_{EA}$	Endanschlagswinkel [°]
$\zeta^*$	Amplitude des Pendelwinkels bei stetigem Wind [°]
$\varphi$	Winkel bei Drehschwingung [°]
$\Theta$	Pitchwinkel [°]
$\nu$	kinematische Viskosität [m <sup>2</sup> /s]
$\xi$	Lehrsches Dämpfungsmaß [-]
$\phi$	Anströmwinkel [°]
$\rho$	Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Schnelllaufzahl [-]
$\sigma_r$	Blattüberdeckungsgrad [-]
$\sigma_u$	Standardabweichung des turbulenten Windes [m/s]
$\Omega$	Rotordrehfrequenz [min <sup>-1</sup> ]
$\omega_D$	gedämpfte Eigenfrequenz [Hz]
$\omega_0$	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 Nabenbiegemoments 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.

