

Hoch belastete Großwälzlagerungen in Windenergieanlagen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines

Doktor-Ingenieurs

vorlegt von

Dipl.-Ing. Daniel Becker

aus Korbach

genehmigt von der

Fakultät für Mathematik / Informatik und Maschinenbau

der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

14.12.2011

Hauptberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. G. Poll, LUH

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 16

Daniel Becker

**Hoch belastete Großwälzlagerungen
in Windenergieanlagen**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0997-2

ISSN 1611-8154

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze für die wissenschaftliche Betreuung, den Freiraum bei der Bearbeitung und die persönliche Unterstützung. Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Poll danke ich für das Interesse an dieser Arbeit, die Übernahme des Korreferates und die damit verbundene Arbeit.

Für die enge Zusammenarbeit innerhalb der TU Clausthal bedanke ich mich bei Herrn Dr. H. Behnke, Herrn A. Rempke und Herrn K. Hinkemann. Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Neubert und Herrn Dr. R. Dölling danke ich für die Unterstützung beim Aufbau und der Durchführung der Korrosionsanalytik.

Meinen ehemaligen Kollegen am Institut danke ich für die Kooperation und das stets angenehme Arbeitsklima. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr.-Ing. H. Blumenthal, Dr. rer. nat. L. Brouwer sowie T. Hagemann für die kritischen und konstruktiven Diskussionen. Der Institutswerkstatt insbesondere Herrn K. Eisfelder gilt mein Dank für die Unterstützung beim Auf- und Umbau der Prüfstände.

Für die Studienförderung im Rahmen der Rheinstahl-Stiftung gebührt mein Dank der Thyssen Krupp AG, Essen. Diese Arbeit ist in Kooperation mit der Thyssen Krupp Rothe Erde GmbH in Lippstadt entstanden. Danken möchte ich an dieser Stelle dem Hauptabteilungsleiter Herrn Dr.-Ing. U. Breucker sowie den Abteilungsleitern Herrn Dr.-Ing. J. Rollmann und Herrn Dr.-Ing. T. Handreck für die kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit in diesen Jahren.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Studenten, die diese Arbeit mit theoretischen Beiträgen und ihrer unermüdlichen Unterstützung bei der Durchführung der Prüfläufe begleitet haben. Mein Dank gilt stellvertretend den Herren Elias und Tarigan.

Fernab der beruflichen Welt gebührt meinen Eltern ein herzlicher Dank für die Förderung meiner Ausbildung sowie meiner Freundin für Ihr Verständnis und die entgegengebrachte Unterstützung in dieser Zeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Symbolverzeichnis.....	III
1 Abstract.....	1
2 Einleitung.....	2
2.1 Problemstellung.....	2
2.2 Zielsetzung.....	4
3 Wälzgelagerte Blattlager unter tribokorrosiver Beanspruchung	5
3.1 Grundlagen wälzgelagerter Blattlager	5
3.1.1 Reibmoment.....	6
3.1.2 Kontaktmechanische Verhältnisse am Prüflager.....	7
3.1.3 Kinematische Verhältnisse.....	9
3.2 Tribologisches Verschleißverhalten des Blattlagers.....	11
3.2.1 Mechanismus der Riffelbildung und Reibkorrosion	11
3.2.2 Verschleißbewertung bei Reibkorrosion.....	12
3.2.3 Reibkorrosionsanalytik mittels elektrochemischer Prozessgrößen.....	13
3.2.4 Einsatz von Schmierstoffen zur Minimierung des Verschleißes	18
3.3 Schmierfettprüfung für zyklisch schwenkende Blattlager	20
3.4 Aufbau des ITR Riffelschwenk-Prüfstands	21
3.4.1 Messtechnik	22
3.4.2 Durchführung und statistische Auswertung der Prüfläufe	25
3.5 Ergebnisse der Schmierfettprüfung für Blattlager.....	28
4 Numerische Simulation schubbehafteter Festkörperkontakte.....	36
4.1 Deterministische Kontaktsimulation.....	36
4.1.1 Mechanisches Ersatzmodell.....	37
4.1.2 Randbedingungen des Festkörperkontakts.....	39
4.1.3 Optimierung der Rechenzeit unter Einsatz der Faltungstechnik.....	40
4.1.4 Aufbau des numerischen Algorithmus.....	42
4.1.5 Validierung und Test des numerischen Berechnungsmodells.....	44
4.2 Mechanische Beanspruchung schubbehafteter Tribosysteme	51

4.2.1	Berechnung des örtlichen dreidimensionalen Spannungstensors.....	52
4.2.2	Vergleichsspannungshypothesen und Hauptnormalform.....	54
4.3	Lebensdauerabschätzung zyklisch belasteter Wälzlagerungen	57
4.3.1	Tribolebensdauer auf Basis schnittebenenbezogener Hypothesen	58
4.3.2	Hypothese nach dem örtlichen Verformungskonzept.....	60
4.3.3	Numerische Umsetzung der zyklischen Schädigungsbewertung	62
5	Berechnungsergebnisse Blattlagerkontakt	65
5.1	Kontaktmechanik.....	65
5.2	Triboinduzierte Werkstoffbeanspruchung.....	67
5.3	Tribolebensdauer	72
6	Numerische Simulation elastohydrodynamischer Kontakte	77
6.1	Problemstellung.....	78
6.2	Impuls- und Kontinuitätsgleichung am Fluidelement	78
6.3	Randbedingungen der numerischen Simulation.....	82
6.3.1	Thermophysikalische und rheologische Schmierstoffeigenschaften ...	84
6.4	Kinematik im Wälzkontakt	86
6.5	Geometrie im Wälzkontakt	88
6.6	Numerische Lösung der <i>Reynolds'schen</i> Differenzialgleichung.....	91
6.7	Elastische Spaltverformungsgleichung.....	98
6.8	Kopplung der Elastizitäts- und der <i>Reynolds'schen</i> Differenzialgleichung	100
6.9	Reibung beim elastohydrodynamischen Kontakt	107
7	Berechnungsergebnisse Rotorhauptlager	109
7.1	Nichtelastohydrodynamische Kontaktsimulation	111
7.1.1	Betriebslastfall.....	111
7.1.2	Extremlastfall.....	118
7.2	Elastohydrodynamische Kontaktsimulation	120
7.2.1	Analytische Näherungslösung für die Minimalspaltweite.....	120
7.2.2	Betriebslastfall.....	121
8	Zusammenfassung und Ausblick	131
9	Literaturverzeichnis	137