

# **Stillstehende fettgeschmierte Wälzlager unter dynamischer Beanspruchung**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Christian Schadow

geb. am 12.05.1982 in Schönebeck/Elbe

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Ludger Deters

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll

Promotionskolloquium am 23.09.2016



Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

Band 5/2016

**Christian Schadow**

**Stillstehende fettgeschmierte Wälzlager  
unter dynamischer Beanspruchung**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4858-2

ISSN 1615-7192

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie des Instituts für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg auf der Basis von zwei Forschungsvorhaben, welche durch die Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. gefördert wurden. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Deters, Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion und Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie, für die wissenschaftliche Betreuung, für die vielen wertvollen und sehr konstruktiven Diskussionen während der Erstellung dieser Arbeit sowie für die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Poll, Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion und Tribologie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Gutachtens und das Interesse an dieser Arbeit. Ebenfalls sei Herrn Jun.-Prof. Dr.-Ing. Woschke für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt.

Außerdem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie für viele hilfreiche Anregungen sowie für die sehr angenehme, offene und kollegiale Arbeitsatmosphäre bedanken, welche eine große Bedeutung für das Gelingen dieser Arbeit hatte. Zudem gilt mein Dank allen wissenschaftlichen Hilfskräften, welche mich bei der Durchführung und Auswertung der umfangreichen experimentellen Untersuchungen unterstützt haben, sowie allen Projekt- und Masterarbeitern für den Aufbau des transienten FE-Modells.

Des Weiteren gilt mein Dank der Arbeitsgruppe "False-Brinelling" der FVA unter der Leitung von Dr. Dornhöfer und allen beteiligten Mitgliedsfirmen insbesondere für die kostenfreie Bereitstellung bzw. Herstellung der Schmierstoffe (Fuchs Schmierstoffe GmbH, Carl Bechem GmbH, Klüber Lubrication München SE & Co. KG, BP Europa SE, Fuchs Lubritech GmbH), der Prüflager (Schaeffler Technologies AG & Co. KG, SKF GmbH), der zahlreichen Schmierstoffuntersuchungen, REM- und FIB-Analysen (Robert Bosch GmbH, Volkswagen AG) sowie für die konstruktiven und anregenden Diskussionen während der Arbeitsgruppensitzungen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern für die liebevolle Unterstützung, den großen Rückhalt und die Geduld bedanken. Meiner Schwester Jeanette Schadow danke ich für die wissenschaftlichen Anmerkungen und die Bereitschaft, sich mit einem absolut fachfremden Thema auseinanderzusetzen. Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Claudia Schadow für das entgegengebrachte Verständnis und den Freiraum, insbesondere in der letzten Phase der Erstellung dieser Arbeit.



## Kurzfassung

Wälzlagerungen in Maschinen, Windenergieanlagen, Fahrzeugen etc., welche während des Transportes, bei Instandhaltungsarbeiten oder während anderer betriebsbedingter Ruhezeiten stillstehen, können in diesen Phasen dynamischen Lasten und/ oder Schwenkbewegungen mit sehr kleinen Amplituden ausgesetzt sein. Dadurch kommt es in den Kontakten zwischen den Wälzkörpern und Lagerringen zu oszillierenden Mikrorelativbewegungen, die Verschleißschäden an Laufbahnen und Wälzkörpern hervorrufen können. Dieser Mechanismus wird als False-Brinelling bezeichnet. Ziel dieser Arbeit war es zunächst, ein standardisierbares Prüfverfahren zu entwickeln, mit welchem Schmierstoffe unter False-Brinelling-Bedingungen getestet werden können. Begleitet von theoretischen Betrachtungen und Finite-Elemente-Simulationen sollten mit dieser Prozedur eine begrenzte Auswahl von Schmierstoffen hinsichtlich ihrer Eignung unter False-Brinelling-Bedingungen geprüft werden, um Erklärungsansätze für die Entstehung von False-Brinelling-Schäden zu finden und um erste Hinweise für die Auswahl und Zusammensetzung von Schmierstoffen zur Reduzierung solcher Schäden zu geben.

Auf einem neu konstruierten False-Brinelling-Prüfstand, auf welchem sowohl Schrägkugellager (7205) als auch Kegelrollenlager (32005 X) unter dynamischen Lasten mit überlagerter Schwenkbewegung geprüft werden können, wurde für den Punktkontakt eine Prüfeinstellung erarbeitet, mit der reproduzierbare und differenzierbare Schädigungen bei der Untersuchung von verschiedenen Schmierstoffen erzeugt werden können. Auf der Basis von Prüfstandsversuchen mit dieser erarbeiteten Parameterkombination wurden verschiedene Modellfette hinsichtlich ihres False-Brinelling-Verhaltens bewertet. Dabei wurden Schmierfette mit unterschiedlichen Eindickern, Grundölen, Additiven sowie Festschmierstoffen geprüft. Darüber hinaus wurden für die Fette rheologische Schmierfettparameter, wie der Speicher- und der Verlustmodul, die Fließgrenze, die Scherviskosität, sowie das Ölabscheideverhalten in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. Der Vergleich der Ergebnisse der False-Brinelling-Prüfungen mit den Schmierfetteigenschaften offenbarte Zusammenhänge zwischen den rheologischen Fetteigenschaften und der Schädigungshöhe.

Mit Hilfe von transienten FE-Rechnungen und verschiedenen Schlupfmodellen konnten die lateralen Verteilungen des Schlupfes und der Spannungen in der Kontaktfläche bestimmt werden. Auf dieser Basis wurden Erklärungsansätze für die Entstehung von False-Brinelling-Schäden abgeleitet.

Um herauszufinden, ob False-Brinelling-Schäden in Wälzlagern die Ermüdungslebensdauer reduzieren können, wurden abschließend auf einem FE8-Prüfstand mit modifiziertem Prüfkopf Lebensdauerversuche mit moderat und stark vorgeschädigten sowie mit neuen, ungeschädigten Wälzlagern als Referenz durchgeführt.



# Inhaltsverzeichnis

## Formelzeichen

## Abkürzungen

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Stand der Forschung.....	2
1.3	Fazit aus dem Stand der Forschung und abgeleiteter Forschungsbedarf .....	16
1.4	Forschungsziel und Lösungsweg.....	17
<b>2</b>	<b>Theoretische Betrachtungen.....</b>	<b>19</b>
2.1	Definition False-Brinelling.....	19
2.2	Ursachen und Entstehung.....	21
2.3	Schlupfarten in Wälzlagern .....	22
2.3.1	Differentialschlupf .....	22
2.3.2	Kraftschlusschlupf.....	23
2.3.3	Bohrschlupf.....	24
2.3.4	Schlupf bei Kontaktverformung .....	25
2.3.4.1	Schlupf infolge dynamischer Kontaktnormalkräfte.....	25
2.3.4.2	Schlupf beim reinen Rollen.....	26
<b>3</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>29</b>
3.1	False-Brinelling-Wälzlagerversuche .....	29
3.1.1	Aufbau und Funktionsweise des False-Brinelling-Wälzlagerprüfstandes .....	29
3.1.2	Versuchsvorbereitung .....	30
3.1.3	Versuchsplanung.....	31
3.1.3.1	Prüflager.....	31
3.1.3.2	Symbolisierte Darstellung der Prüflagerbelastung .....	32
3.1.3.3	Berechnung der Kräfte auf die Prüflagerung .....	34
3.1.3.4	Vorversuche .....	35
3.1.3.5	Einfluss von Eindicker und Grundöl.....	38
3.1.3.6	Einfluss von Additiven und Festschmierstoffen .....	40
3.1.3.7	Stichversuche .....	41
3.1.4	Versuchsauswertung .....	43
3.1.4.1	Standardauswertung .....	44
3.1.4.2	Rissdetektierung.....	47
3.1.4.3	Gefügeanalysen.....	50
3.1.4.4	Chemische Oberflächenanalysen .....	51
3.2	Lebensdauerversuche .....	53

3.2.1	Aufbau modifizierter FE8-Prüfkopf .....	53
3.2.2	FE8-Prüfbedingungen .....	54
3.2.3	Versuchsplanung Lebensdauerversuche .....	56
3.3	Bestimmung der Ölabscheidung der Schmierfette .....	58
3.4	Rheometeruntersuchungen .....	59
3.4.1	Speicher-, Verlustmodul und Fließgrenze .....	59
3.4.2	Scheinbare Viskosität.....	60
3.5	Bestimmung der Reibungskoeffizienten mittels Tribomesszelle.....	61
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der False-Brinelling-Wälzlagerversuche .....</b>	<b>63</b>
4.1	Vorversuche.....	63
4.1.1	Lastfall A .....	63
4.1.1.1	Belastungsszenarium A1 .....	63
4.1.1.2	Belastungsszenarium A2.....	67
4.1.1.3	Belastungsszenarium A3.....	70
4.1.1.4	Fazit Lastfall A.....	71
4.1.2	Lastfall B.....	71
4.1.2.1	Belastungsszenarium B1 .....	72
4.1.2.2	Belastungsszenarium B2.....	74
4.1.2.3	Belastungsszenarium B3 .....	76
4.1.2.4	Stichversuche .....	77
4.1.2.5	Fazit Lastfall B.....	80
4.1.3	Lastfall C.....	80
4.1.3.1	Belastungsszenarium C1 .....	82
4.1.3.2	Belastungsszenarium C2 .....	86
4.1.3.3	Fazit Lastfall C.....	90
4.1.4	Definition von Standardbedingungen für False-Brinelling-Prüfungen.....	91
4.2	Variation von Grundöl und Eindicker .....	95
4.3	Variation Additive und Festschmierstoffe .....	99
4.3.1	Lithiumkomplexfette.....	99
4.3.2	Polyharnstofffette.....	102
4.3.3	Fazit Variation Additive und Festschmierstoffe .....	104
4.4	Stichversuche.....	105
4.4.1	Einfluss von Lithiumkomplexfetten mit PAO-Gemischen.....	105
4.4.2	Einfluss eines polaren Grundöls (Ester) .....	107
4.4.3	Einfluss von Konservierungsmitteln.....	108
4.4.4	Variation Wälzkörperwerkstoff (Keramikkugeln).....	110
4.4.5	Untersuchung von Radialrillenkugellagern bei radialer Belastung .....	112
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Lebensdauerversuche .....</b>	<b>115</b>

<b>6</b>	<b>Ergänzende Untersuchungen .....</b>	<b>119</b>
6.1	Referenzfette und Modellfette A bis I .....	119
6.1.1	Bestimmung der Ölabscheidung .....	119
6.1.2	Rheologische Untersuchungen .....	121
6.1.3	Bestimmung der Reibungskoeffizienten .....	122
6.2	Weitere Modellfette .....	125
6.2.1	Bestimmung der Ölabscheidung .....	125
6.2.2	Rheologische Untersuchungen .....	126
6.2.2.1	Speicher-, Verlustmodul und Fließgrenze .....	126
6.2.2.2	Viskosität .....	128
6.2.3	Bestimmung der Reibungskoeffizienten .....	129
6.3	Rissdetektion .....	131
6.4	Gefügeanalysen .....	133
6.4.1	Gefügeanalysen .....	133
6.5	REM- und Oberflächenanalysen .....	137
6.5.1	REM- und EDX-Analysen .....	137
6.5.2	SIMS- und AES-Analysen .....	141
<b>7</b>	<b>Transiente FE-Simulation .....</b>	<b>145</b>
7.1	Modellaufbau .....	146
7.2	Simulationsergebnisse – Vergleich mit Schadensbildern .....	148
7.2.1	Lastfall A2 .....	150
7.2.2	Lastfall B2.1 - kleiner Schwenkwinkel ( $\beta = \pm 0,25^\circ$ ) .....	151
7.2.3	Lastfall B2.2 – großer Schwenkwinkel ( $\beta = \pm 1,43^\circ$ ) .....	151
7.2.4	Bohrschlupf .....	152
7.2.5	Kraftschlupf .....	153
7.2.6	Überlagerung von Differential- und Bohrschlupf .....	153
7.3	Fazit Simulation .....	154
<b>8</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>155</b>
8.1	Referenzfette und Modellfette A bis I .....	155
8.1.1	Einfluss der Ölabscheidung auf False-Brinelling-Wälzlagerschäden .....	156
8.1.2	Einfluss der Fettrheologie auf False-Brinelling-Wälzlagerschäden .....	156
8.1.3	Einfluss des Reibungskoeffizienten auf False-Brinelling-Wälzlagerschäden .....	158
8.1.4	Zwischenfazit .....	158
8.2	Weitere Modellfette .....	159
8.2.1	Einfluss der Ölabscheidung auf False-Brinelling-Wälzlagerschäden .....	159
8.2.2	Einfluss der Fettrheologie auf False-Brinelling-Wälzlagerschäden .....	160
8.2.3	Einfluss des Reibungskoeffizienten auf False-Brinelling-Wälzlagerschäden .....	164
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>165</b>

<b>10 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>169</b>
<b>A Anhang</b> .....	<b>i</b>
A 1 Kräfte auf die Prüflagerung (Schräggugellagerung – 7205).....	i
A 2 Kräfte auf die Prüflagerung (Kegelrollenlagerung – 32005 X).....	ii
A 3 Abschätzung der Scherrate im False-Brinelling-Kontakt.....	iii
A 4 Belastungsszenarium C1.....	iv
A 5 Belastungsszenarium C2.....	v
A 6 Laufzeitvariation mit dem Belastungsszenarium C2.....	vii
A 7 Variation Grundöl und Eindicker.....	ix
A 8 Ölabscheidung.....	xiii
A 9 Rheologiemessungen mit den Modellfetten A bis I und den Referenzfetten.....	xiv
A 10 Kurvenverläufe der Reibungskoeffizienten der Modellfette A bis I.....	xvi
A 11 Kurven der Speicher- und Verlustmodulmessungen.....	xviii
A 12 Kurvenverläufe der Reibungskoeffizientmessungen.....	xxvi

## Formelzeichen

### Lateinische Großbuchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
$A$	$\mu\text{m}^2$	Fläche
$B$	$\text{mm}$	Lagerbreite
$C$	$\text{kN}$	dynamische Tragfähigkeit
$C_0$	$\text{kN}$	statische Tragfähigkeit
$C_u$	$\text{kN}$	Ermüdungsgrenzbelastung
$D$	$\text{mm}$	Außendurchmesser Lageraußenring
$F$	$\text{N}$	Kraft
$F_N$	$\text{N}$	Normalkraft/ Kontaktnormalkraft
$\Delta F$	$\text{N}$	Lastamplitude
$G'$	$\text{Pa}$	Speichermodul
$G''$	$\text{Pa}$	Verlustmodul
$L_{10h}$	$h$	nominelle Lagerlebensdauer
$L_{10mh}$	$h$	modifizierte Lagerlebensdauer mit 10 % Ausfallwahrscheinlichkeit
$L_{10h,exp}$	$h$	experimentell ermittelte nominelle Lagerlebensdauer
$N$	-	Anzahl der Lastwechsel
$P$	$\text{kN}$	äquivalente dynamische Lagerbelastung
$P_0$	$\text{kN}$	äquivalente statische Lagerbelastung
$P_{spez}$	$\text{W}/\text{mm}^2$	spezifische Reibleistung
$R$	-	Bestimmtheitsmaß
$R_a$	$\mu\text{m}$	arithmetischer Mittenrauwert
$R_e$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Streckgrenze
$R_q$	$\mu\text{m}$	quadratischer Mittenrauwert
$R_z$	$\mu\text{m}$	gemittelte Rautiefe
$T$	$s$	Periodendauer

**Lateinische Kleinbuchstaben**

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Benennung</b>
$a$	$\mu m$	Länge der großen Halbachse einer Ellipse
$b$	$\mu m$	Länge der kleinen Halbachse einer Ellipse
$d$	$mm$	Durchmesser/ Bohrungsdurchmesser Lagerinnenring/ Kugeldurchmesser
$f$	$Hz$	Frequenz
$f_{\beta}$	$Hz$	Schwenkfrequenz
$f_L$	$Hz$	Lastfrequenz
$f_{max}$	-	maximale Kraftschlusszahl
$h$	$\mu m$	minimale Schmierspalthöhe
$m$	$kg$	Masse
$n$	$min^{-1}$	Drehzahl
$p$	$N/mm^2$	Pressung/ Druck
$p(x)$	$N/mm^2$	Pressungsverteilung/ Druckverteilung
$p_{max}$	$N/mm^2$	maximale HERTZ'sche Pressung
$q(x)$	$N/mm^2$	wirksame Schubspannungsverteilung
$q'(x)$	$N/mm^2$	maximal übertragbare Schubspannungsverteilung
$q''(x)$	$N/mm^2$	entgegen $q'(x)$ wirkende Schubspannungsverteilung
$r$	$mm$	Radius
$s$	$\mu m$	Gleitweg
$s_{abs}$	$\mu m$	absoluter Gleitweg
$s_{gleit}$	$\mu m$	kumulierter Gleitweg
$t$	$h, min, s$	Zeit

**Griechische Kleinbuchstaben**

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Benennung</b>
$\alpha$	°	Druckwinkel
$\alpha_0$	°	Nenndruckwinkel
$\alpha_{FB}$	°	sich einstellender Druckwinkel im False-Brinelling-Wälzlagerprüfstand
$\alpha_{FE8}$	°	sich einstellender Druckwinkel im FE8-Prüfkopf
$\beta$	°	Schwenkwinkel
	-	Ausfallsteilheit im Weibull-Netz
$\varphi$	rad	Auslenkwinkel
$\gamma$	%	Deformation
$\gamma_0$	%	Deformationsamplitude
$\dot{\gamma}$	1/s	Scherrate
$\delta$	°	Phasenverschiebung
$\varepsilon$	-	Überdeckungsverhältnis
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\kappa$	-	Viskositätsverhältnis
$\lambda$	-	spezifische Schmierfilmdicke
$\mu$	-	Reibungskoeffizient
$\nu$	mm <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität
$\nu_{40}$	mm <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität bei 40 °C
$\nu_{100}$	mm <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität bei 100 °C
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Normalspannung
$\tau$	N/mm <sup>2</sup>	Schubspannung
$\tau_0$	N/mm <sup>2</sup>	Schubspannungsamplitude
$\tau_f$	Pa	Fließgrenze
$\tau_{res}$	N/mm <sup>2</sup>	resultierende Schubspannung

---

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Benennung</b>
$\psi$	$^{\circ}$	Lastzone im Prüflager
$\omega_A$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit am Außenringkontakt
$\omega_J$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit am Innenringkontakt
$\omega_R$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit in Richtung der Berührungstangente
$\omega_{BA}$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit in Richtung der Berührungsnormale am Außenringkontakt
$\omega_{BJ}$	$s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit in Richtung der Berührungsnormale am Innenringkontakt

### Häufig verwendete Indizes und Symbole

<b>Index / Symbol</b>	<b>Erläuterung</b>
$a$	außen
$AR$	Außenring
$ax$	axial
$i$	innen
$IR$	Innenring
$max$	Maximum
$min$	Minimum
$K$	Kugel
$L$	Last
$rad$	radial
$WK$	Wälzkörper

---

## Abkürzungen

AES	Augerelektronen-Spektroskopie
AK	Antikorrosion (Additiv)
AO	Antioxidanz (Additiv)
AR	Außenring
AW	anti wear (Additiv)
DLC	Diamond-Like-Carbon (Beschichtung)
EDX	energie-dispersive Röntgenspektroskopie (engl.: energy dispersive X-ray spectroscopy)
EP	extreme pressure (Additiv)
FE8	Fettprüfeinheit 8
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIB	Focused Ion Beam
FSST	Festschmierstoff
FT-IR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
IMK	Institut für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
IP	Individual Pitch
IR	Innenring
GSR	gross slip regime
KRL	Kegelrollenlager
LiX	Lithiumkomplex
LM	Lichtmikroskop
MLE	Maximum-Likelihood-Estimate
MPC	Multi-Point-Constraints
MSSR	mixed stick-slip regime
naphth.	naphthenbasisch
NC	nitrocarburiert (Beschichtung)

## Abkürzungen

---

PAO	Polyalphaolefin
paraff.	paraffinbasisch
PFPE	Perfluorpolyether
PPG	Polypropylenglykol
PTFE	Polytetrafluorethylen
PU	Polyharnstoff/ Polyurethan
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
RRKL	Radialrillenkugellager
RT	Raumtemperatur
SEM	Sekundärelektronenmikroskopie
SIMS	Sekundärionen-Massenspektrometrie
SKL	Schräggkugellager
SNMS	Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie
SR	stick regime
SRV	Schwingreibverschleiß
VI	Viskositätsindex
VKA	Vier-Kugel-Apparat
WEA	Windenergieanlage
XPS	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (engl.: x-ray photoelectron spectroscopy)