

Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 444

Dipl.-Ing. (FH) Alexander Pabst,
Eckental

Steigerung der Ermüdungslebensdauer von Wälzlagern durch gezielt eingebrachte Druckeigenstressungen

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Steigerung der Ermüdungslebensdauer von Wälzlagern durch gezielt eingebrachte Druckeigenstressungen

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Alexander Pabst

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt

von der Technischen Fakultät

der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 6.7.2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. (FH) Alexander Pabst,
Eckental

Nr. 444

Steigerung der
Ermüdungslebensdauer
von Wälzlagern durch
gezielt eingebrachte
Druckeigenstressungen

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Pabst, Alexander

Steigerung der Ermüdungslebensdauer von Wälzlagern durch gezielt eingebrachte Druckeigenspannungen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 444 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

152 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.

ISBN 978-3-18-344401-4, ISSN 0178-949X,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Wälzlager – Ermüdung – Lebensdauersteigerung – Druckeigenspannung – Verfestigung – Lebensdauermodell – Vergleichsspannung – Ermüdungsversuche – Röntgenlinienhalbwertsbreite

Einen Ansatz zur Lebensdauersteigerung von Wälzlagern stellt die gezielte Einbringung von Druckeigenspannungen in die Randschicht dar. Es werden Lebensdauerversuche unter dem Einfluss gezielt eingebrachter Druckeigenspannungen durch mechanische Verfestigungs- und Wärmebehandlungsverfahren vorgestellt. Die erreichte Lebensdauersteigerung wird durch die Kaltverfestigung und die unterschiedliche Gefügeausbildung und die damit verbundene Erhöhung der Beanspruchbarkeit erklärt. In rechnerischen Untersuchungen werden Vergleichsspannungshypothesen und Lebensdauermodelle eingesetzt, die letztendlich die Bestimmung der rechnerischen Lebensdaueränderung ermöglichen. Der Eigenspannungs- bzw. Verfestigungseinfluss kann dabei auf unterschiedliche Arten berücksichtigt werden. Einerseits werden die Eigenspannungen als eine Komponente der Beanspruchung betrachtet. Andererseits ist auch die Berücksichtigung alleine in der Beanspruchbarkeit des Werkstoffs denkbar.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.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 www.dnb.de.

D 29

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

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 978-3-18-344401-4

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand parallel zu meiner Tätigkeit bei Schaeffler Technologies im Geschäftsbereich Getriebeanwendungen der Schaeffler Technologies AG & Co. KG während meiner Zeit als externer Doktorand am Lehrstuhl für Konstruktions-technik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack für die dauerhafte Unterstützung und Begleitung meiner Forschung. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge für die freundliche Übernahme der Begutachtung meiner Arbeit außerordentlich Bedanken. Ebenso möchte ich ein Dankeschön an den Drittprüfer Prof. Dr.-Ing. Stefan Will sowie Prof. Dr.-Ing. Tino Hausotte als Vorsitzenden der Prüfungskommission nicht unerwähnt lassen.

Bei Dr.-Ing. Stephan Tremmel möchte ich mich sehr für die guten Diskussionen, zahlreichen Anregungen und die fachliche Unterstützung bedanken. Dem ganzen Lehrstuhlteam gilt mein Dank für die hervorragende Arbeitsatmosphäre.

Hervorheben möchte ich die Ermöglichung dieser Arbeit durch den Geschäftsbereich Getriebeanwendungen der Schaeffler Technologies AG & Co. KG und allen darüber hinaus beteiligten Personen, die durch Zusammenarbeit bei Versuchen, Berechnungen, Befundungen und Messungen sehr zum Gelingen beigetragen haben.

Am meisten möchte ich mich bei meiner Frau Verena für die enorme Hilfe und größtes Verständnis genauso wie bei meinen Kindern Nele, Finn, Jana und Timm für die vielen schönen Momente des Ausgleichs über die Jahre hinweg bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Effizienzsteigerung und Downsizing.....	1
1.2	Maßnahmen zur Lebensdauersteigerung	2
1.3	Zielsetzung	3
2	Stand der Technik und Forschung	6
2.1	Wälzlager.....	6
2.1.1	Bedeutung und Aufbau.....	6
2.1.2	HERTZscher Kontakt.....	7
2.1.3	Wälzkontakt	8
2.1.4	Wälzlagerschäden und Werkstoffermüdung.....	9
2.1.5	Vergleichsspannungshypothesen zur Beanspruchungsbeurteilung.....	11
2.1.5.1	Wechselschubspannung / Orthogonalschubspannung.....	12
2.1.5.2	Gestaltänderungsenergiehypothese / von Mises Spannung.....	12
2.1.5.3	Hauptschubspannung / Tresca Spannung.....	14
2.1.5.4	Hypothese nach Dang Van.....	15
2.1.5.5	Schubspannungsintensitätshypothese.....	16
2.1.6	Klassische Ermüdung und Lebensdauerberechnung.....	19
2.1.6.1	Fehlstellenmodell nach Weibull	20
2.1.6.2	Lebensdauermodell nach Lundberg & Palmgren.....	21
2.1.6.3	Lebensdauermodell nach Ioannides & Harris.....	22
2.1.6.4	Verallgemeinerte Lebensdauerformel.....	23
2.1.6.5	Lebensdauermodell nach Zaretsky	24
2.1.6.6	Genormte Lebensdauerberechnung nach DIN ISO 281:2007.....	25
2.1.7	Ermüdungsversuche und experimentell bestimmte Lebensdauer	26
2.2	Druckeigenspannungen im Wälzkontakt	32
2.2.1	Eigenspannungen.....	32
2.2.2	Einfluss von Eigenspannungen auf die Lebensdauer.....	34
2.2.2.1	Experimentelle Untersuchungen	34
2.2.2.2	Rechnerische Untersuchungen	40
3	Lebensdauereinfluss gezielt eingebrachter Druckeigenspannungen	47
3.1	Experimentelle Untersuchungen	47
3.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung.....	47

3.1.2	Herstellung der Prüflinge	52
3.1.2.1	Kugelstrahlen	56
3.1.2.2	Festwalzen	62
3.1.2.3	Induktive Randschichthärtung	65
3.1.3	Versuchsergebnisse	68
3.1.3.1	Schadensanalyse	68
3.1.3.2	Ermüdungslebensdauer	73
3.1.3.3	Gebrauchsdauer	77
3.1.3.4	Eigenspannung und Röntgenlinienhalbwertsbreite	79
3.1.3.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	85
3.2	Rechnerische Untersuchung	87
3.2.1	Gestaltänderungsenergiehypothese / von Mises Spannung	90
3.2.2	Variante der Schubspannungsintensitätshypothese	92
3.2.3	Lebensdauermodelle	93
3.2.4	Berücksichtigung auf Beanspruchungsseite	94
3.2.5	Berücksichtigung auf Beanspruchbarkeitsseite	103
4	Diskussion	111
4.1	Veränderung der Eigenspannungen bei Wälzbeanspruchung	111
4.2	Abhängigkeit von Werkstoffkennwerten	112
4.3	Tiefengewichtung im Lebensdauermodell	114
4.4	Risseinleitung und Risswachstum	116
4.5	Einfluss der Belastung und des beanspruchten Volumens	117
4.6	Einfluss von Gefügeunterschieden und Verfestigung	118
4.7	Röntgenlinienhalbwertsbreite als Charakterisierungsmerkmal	119
5	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse	121
6	Ableitung von weiterem Forschungsbedarf	124
7	Potentialabschätzung an einem Anwendungsbeispiel	125
8	Fazit und Ausblick	129
9	Literatur	131

Nomenklatur

Indizes

a	Ausschlagswert
eff	Effektivwert
i	diskretes Element
m	Mittelspannungswert
max	Maximalwert
va	Vergleichsausschlagswert
vm	Vergleichsmittelwert
$\gamma\varphi$	Schnittebenen der Einheitskugel
x, y, z	Koordinatenrichtungen

Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

a	Materialeinflussfaktor der Schubspannungsintensitätshypothese
a	Lange Druckellipsenhalbachse
a_l	Lebensdauerbeiwert für die Erlebenswahrscheinlichkeit
a_{ISO}	Lebensdauerbeiwert für die Betriebsbedingungen
b	Materialeinflussfaktor der Schubspannungsintensitätshypothese
b	Formparameter / experimentelle Weibullkonstante / Parameter für die Streuung der Ausfälle
B_{10}	Experimentelle Lebensdauer (Ausfallwahrscheinlichkeit 10%)
b_m	Faktor in der Tragzahlberechnung
c	Lastexponent
C	Dynamische Tragzahl
e	Weibullexponent
e	EULERSche Zahl
F	Ausfallwahrscheinlichkeit eines Lagers
F	Kraft
h	Tiefenexponent
k	Weibullexponent
k_{hyd}	Einflussfaktor für den hydrostatischen Druck

l	Länge der Laufbahn
L_{10}	Nominelle Lebensdauer
L_{10r}	Nominelle Referenzlebensdauer
L_{eff}	Effektive Länge
L_{nm}	Erweiterte / modifizierte Lebensdauer
L_{nmr}	Modifizierte Referenzlebensdauer
m	Materialeinflussfaktor der Schubspannungsintensitätshypothese
m	Weibullexponent
MPa	Megapascal
$M_{\sigma ES}$	Einflussfaktor zur Berücksichtigung der Verfestigung
n	Materialeinflussfaktor der Schubspannungsintensitätshypothese
N	Anzahl der Überrollungen / Lastzyklenzahl
$n(\sigma)$	Materialabhängiges Spannungskriterium
P	Dynamisch äquivalenten Lagerbelastung
p'_{hyd}	angepasster hydrostatischer Druck
p_0	Hertz'sche Pressung
Q	Kontaktbelastung
Ra	Mittlere Rauheit
Rz	Gemittelte Rautiefe
S	Spannungstensor
S	Überlebenswahrscheinlichkeit
S	Lebensdauerverhältnis bei 50 % Vertrauensniveau
t	Laufzeit eines Lagers
T	Charakteristische Lebensdauer
V	Volumen
z_0	Tiefenlage der maximalen Vergleichsspannung
z'	Spannungsgewichtete Tiefe

Griechische Buchstaben

γ	Schnittwinkel der Schnittebene
ε	Dehnung
κ	Viskositätsverhältnis
μ	Reibwert

μ_{ln}	Mittelwert der Lognormalverteilung
ρ	Krümmungsradien
σ_0	Werkstoffkennwert in Weibull Lebensdauermodell
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen in den Hauptspannungsrichtungen
σ_{Bw}	Biegewechselfestigkeit
σ_{DV}	Vergleichsspannung nach Dang Van
$\sigma_{ES}, \sigma_x^{ES}, \sigma_y^{ES}$	Eigenspannung in x- und y-Richtung
σ_{F^*}	Streckgrenze des Werkstoffs
σ_i	Spannung im diskreten Volumenelement
σ_{ln}	Standardabweichung für die Lognormalverteilung
σ_{Sch}	Zugschwellfestigkeit
σ_{res}	resultierende Spannung
σ_u, σ_{zul}	Ermüdungsgrenze des Werkstoffs
σ_v	Vergleichsspannung
σ_{va}	Vergleichsausschlagsspannung
σ_{vm}	Vergleichsmittelspannung
σ_w	Wechselfestigkeit
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannung in Richtung der kartesischen Koordinate
σ_{ZDw}	Zug-Druck-Wechselfestigkeit
τ	Schubspannung / kritische Schubspannung
τ_1, τ_2, τ_3	Schubspannung in x-Richtung, y-Richtung, z-Richtung
$\tau_{0max}, \tau_{max}, \tau_0$	maximale Schubspannung
τ_v	Vergleichsschubspannung
τ_{Sch}	Torsionsschwellfestigkeit
τ_w	Torsionswechselfestigkeit
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Schubspannung in Richtung der kartesischen Koordinate
φ	Schnittwinkel der Schnittebene

Zusammenfassung

Reibungsreduzierung durch Leistungsverdichtung von Wälzlagern leistet einen aktiven Beitrag zur CO₂-Reduzierung im Antriebsstrang von Fahrzeugen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass gleichzeitig die Tragfähigkeit der Wälzlager reduziert wird. Aus diesem Grund ist für ein Downsizing die Steigerung der Ermüdungslebensdauer notwendig. Einen Ansatz zur Lebensdauersteigerung stellt die gezielte Einbringung von Druckeigenstressungen in die Randschicht von Wälzlagerkomponenten dar.

Es werden Lebensdauerexperimente unter dem Einfluss gezielt eingebrachter Druckeigenstressungen durch mechanische Verfestigungs- und Wärmebehandlungsverfahren vorgestellt. Es zeigen sich für alle Verfahren deutliche Lebensdauersteigerungen. Als ursächlich für die Lebensdauersteigerung werden die Kaltverfestigung und die unterschiedliche Gefügeausbildung und die damit verbundene Erhöhung der Beanspruchbarkeit angesehen.

In rechnerischen Untersuchungen werden zwei exemplarische Vergleichsspannungshypothesen zur Beurteilung des Beanspruchungszustandes eingesetzt. Die Verwendung von Lebensdauermodellen ermöglicht letztendlich die Bestimmung der rechnerischen Lebensdaueränderung in Form einer relativen Lebensdauersteigerung gegenüber dem Referenzzustand ohne gezielt eingebrachte Druckeigenstressungen. Der Eigenstressungs- bzw. Verfestigungseinfluss kann dabei auf unterschiedliche Arten berücksichtigt werden. Einerseits werden die Eigenstressungen als eine Komponente der Beanspruchung betrachtet. Andererseits ist auch die Berücksichtigung alleine in der Beanspruchbarkeit des Werkstoffs denkbar.

Die Erkenntnisse der experimentellen und rechnerischen Untersuchungen führen zu Vorschlägen für die Berücksichtigung des Eigenstressungseinflusses und weiteren notwendigen Untersuchungen. Es wird schließlich bestätigt, dass eine Lebensdauersteigerung durch gezielt eingebrachte Druckeigenstressungen erreichbar ist.

Abstract

Friction reduction as well as increasing performance of rolling bearings contributes significantly towards a reduction of CO₂ emissions in the drivetrain of vehicles. However, it has to be taken in to account, that Downsizing results in a reduction of the load carrying capacity of the rolling bearings. For this reason, additional measures are required to increase the rating life of bearings. One approach for increasing the lifetime of bearings consists of the introduction of residual compressive stresses into the edge layer of the rolling bearing components.

Fatigue tests influenced by selectively introduced compressive residual stresses through work hardening and heat treatment are presented. All methods showed a significant increase in lifetime. The increase of rating life is explained through work hardening and different microstructure and the thereby related increase of strength.

Two exemplary equivalent stress hypotheses were used in calculative investigations to determine the stress condition. The use of rating life models ultimately enables the calculation of life difference in the form of a relative lifetime increase with respect to the reference condition without compressive residual stresses. The residual stress – or work hardening influence can thereby be considered in different ways. On the one hand, the residual stresses can be considered as a component of the stress. On the other hand, consideration only with regards to strength of material is also conceivable.

Combining the findings of the experimental and theoretical investigations leads to suggestions for the consideration of the residual stress influence and the necessity for further studies. Finally it is confirmed that an increase of lifetime by means of introduction of compressive residual stresses is achievable.

