

Auswirkungen von SCHMIERUNG UND VERUNREINIGUNGEN auf die Lagerlebensdauer, Teil 2

Die Lagerlebensdauer wird durch viele Faktoren beeinflusst. Entscheidenden Einfluss dabei haben die Schmierungsbedingungen und der Anteil von Verunreinigungen. Durch ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen der Lagerlebensdauer und den oben genannten Faktoren können Lagerkonstruktion und Betriebseigenschaften verbessert werden. Im zweiten Teil der zweiteiligen Artikelreihe konzentrieren wir uns auf die Verunreinigungen

Der Einsatz von Wälzlagern in Maschinen liefert den klaren Vorteil geringerer Reibungsverluste und verbesserter allgemeiner Systemeffizienz. Allerdings können Partikeleindrücke und Verunreinigungen Spannungskonzentrationen hervorrufen und somit zu Frühausfällen führen. Die sich an einem Eindruck bildenden lokalen Spannungsüberhöhungen können zur Entstehung von Rissen beitragen. In diesem zweiten Artikel der zweiteiligen Artikelreihe wird eine Methodologie vorgestellt, die den mikro-elastohydrodynamischen Schmierfilm (Mikro-EHD) und die darauf bezogenen lokalen Spannungen aufgrund von Verunreinigungseindrücken mit der Ermüdungslebensdauer von Wälzlagern verknüpft. Ein Vergleich zwischen der experimentellen Wälzlagerlebensdauer und der Lebensdauer, die aufgrund der vorliegenden Theorie prognostiziert wird, zeigt die Vorteile des vorgestellten Modells auf, welches die Auswirkungen von Schmierungs- und Verunreinigungsbedingungen auf die Lagerlebensdauer berücksichtigt.

1. DER VERUNREINIGUNGSBEIWER

Nach Ioannides u. a. [1], und dem internationalen Standard ISO 281:2007 [2], wird die modifizierte Lebensdauer von Wälzlagern (mit 90% Überlebenswahrschein-

lichkeit) durch folgende Lebensdauergleichung ausgedrückt:

$$L_{10m} = a_{skf} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (1)$$

In der obigen Gleichung stellt C die dynamische Tragzahl des Lagers dar, P ist die äquivalente Belastung und p ein Exponent (3 für Rillenkugellager und 10/3 für Rollenlager). a_{skf} ist der Spannungslebensdauermodifizierungsbeiwert nach [1] und [2], unter Verwendung der folgenden Beziehung:

$$a_{skf} = \frac{1}{10} \left\langle 1 - \left(\eta \frac{P_u}{P} \right)^w \right\rangle^{-c/e} \quad (2)$$

In Gleichung (2) steht P_u für die Ermüdungsgrenzbelastung des Lagers, w , c und e sind konstante Exponenten und η ist ein Schwächungsbeiwert, festgelegt innerhalb des Bereichs: $0 \leq \eta \leq 1$. Dieser Schwächungsbeiwert wurde eingeführt, um einen Durchschnittswert zum aktuellen Spannungszustand des Wälzkontaktes zu erhalten, der zusätzlich zur ideal glatten Hertzschen Spannung wirkt. Wie in [3] und in Teil 1 dieses Artikels [4] erklärt, kann dieser Schwächungsbeiwert als ein Produkt von zwei zusammenwirkenden Größen beschrieben werden, dem Schmierungsbeiwert η_b und dem Verunreinigungsbeiwert η_c ; so ist: $0 \leq \eta_b \cdot \eta_c \leq 1$.

Im Fall glatter, gut geschmierter Laufbahnen mit einem von Verunreinigungspartikeln freien Schmiermittel kann man idealerweise annehmen, dass $\eta_b = 1$, $\eta_c = 1$; und somit haben beide Beiwerte keinen Einfluss auf die Lagerlebensdauer. Diese Bedingung wird mit der Notation *glatt* und dem Index s gekennzeichnet.

Jedoch mit der Anwesenheit von Verunreinigungspartikeln im Öl wird $\eta_b = 1$ und $\eta_c < 1$, um für die zusätzlichen lokalen Spannungen, die von den Verunreinigungseindrücken auf der Laufbahn herrühren, Rechnung zu tragen. Dieser Zustand erhält die Bezeichnung *eingedrückt* und den Index d .

Man kann nun den Spannungslebensdauermodifizierungsbeiwert für den *glatten* und *eingedrückten* Zustand neu schreiben:

Man kann nun den Spannungslebensdauermodifizierungsbeiwert für den *glatten* und *eingedrückten* Zustand neu schreiben:

$$a_{skf, \text{glatt}} = \frac{1}{10} \left\langle 1 - \left(\frac{P_u}{P} \right)^w \right\rangle^{-c/e} \quad (3)$$

mit $\eta_b = 1$; $\eta_c = 1$

$$a_{skf, \text{eingedrückt}} = \frac{1}{10} \left\langle 1 - \left(\eta_c \frac{P_u}{P} \right)^w \right\rangle^{-c/e} \quad (4)$$

mit $\eta_b = 1$; $\eta_c < 1$

Eine Verringerung der Ermüdungslebensdauer, als Folge von Verunreinigungseindrücken auf den Laufbahnen, kann durch Vergleich der theoretischen Lebensdauer unter ideal sauberen sowie verschmutzten Laufbedingungen zahlenmäßig ausgedrückt werden:

$$\frac{L_{10,d}}{L_{10,s}} = \frac{a_{skf, eingedrückt}}{a_{skf, glatt}} \quad (5)$$

Das obige Verhältnis kann, angewendet auf die aktuelle Geometrie des Wälzkontakts, numerisch unter Verwendung der Ioannides-Harris Ermüdungslebensdauergleichung [5] ausgewertet werden:

$$\ln \frac{1}{S} \approx A \cdot N^e \int_{V_R} \frac{\langle \tau_i - \tau_u \rangle^c}{z^h} dv \quad (6)$$

In Gleichung (6) stellt S die Überlebenswahrscheinlichkeit im Wälzkontakt dar, N ist die Anzahl Ermüdungsspannungszyklen, A ist eine Skalierungskonstante, τ_i das Ermüdungskriterium, τ_u der Ermüdungsgrenzwert bei Schubbeanspruchung, z^h die spannungsbewertete durchschnittliche

Tiefe und V_R ist das gefährdete Spannungsvolumen im Hertzschen Kontakt. Die relevante Größe von Gleichung (6), die das Lebensdauerverhältnis (5) beeinflusst, ist das volumenbezogene Spannungsintegral:

$$I = \int_{V_R} \frac{\langle \tau_i - \tau_u \rangle^c}{z^h} dv \quad (7)$$

Mit der obigen Schreibweise kann die Ermüdungslebensdauer in einem Wälzkontakt (mit u der Anzahl Überrollungen je Umdrehung) ausgedrückt werden als:

$$L_{10} = \frac{N}{10^6 u} \approx \frac{1}{u} \cdot \left(\frac{\ln(1/S)}{A \cdot I} \right)^{1/e} \quad (8)$$

In dieser Gleichung kann das Spannungsintegral (I) für einen Kontakt mit Eindrücken auf der Laufbahn sowie für einen ideal glatten Kontakt berechnet werden. Auf diese Weise kann der Einfluss von Verunreinigungen auf die Lagerlebensdauer bewertet werden, wie auch durch das Lebensdauerverhältnis in Gleichung (5) angegeben. Mit anderen Worten gilt Folgendes:

$$\frac{L_{10,d}}{L_{10,s}} = \frac{a_{skf, eingedrückt}}{a_{skf, glatt}} = \left(\frac{I_{glatt}}{I_{eingedrückt}} \right)^{1/e} \quad (9)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (3) und (4) in die Gleichung (9) ergibt sich der Verunreinigungsbeiwert η_c :

$$\eta_c = \frac{P}{P_u} \left\langle 1 - \left(1 - \left(\frac{P_u}{P} \right)^w \right) \cdot \left(\frac{I_{glatt}}{I_{eingedrückt}} \right)^{-1/c} \right\rangle^{1/e} \quad (10)$$

der den tatsächlichen Spannungszustand im Kontakt beschreibt. Aus Gleichung (10) können für unterschiedliche Mengen an Verunreinigungseindrücken numerische Werte für η_c abgeleitet werden, ausgehend von der Berechnung des volumenbezogenen Ermüdungsspannungsintegrals. Grundsätzlich wird, unter Verwendung der Mikro-EHD-Methodologie, wie sie in Teil 1 dieses Artikels [4] beschrieben worden ist, für Schmierstoffe mit unterschiedlichen Anteilen von Verunreinigungspartikeln das Lebensdauerverhältnis aus Gleichung (9) ausgewertet. Zur Durchführung dieser Be-

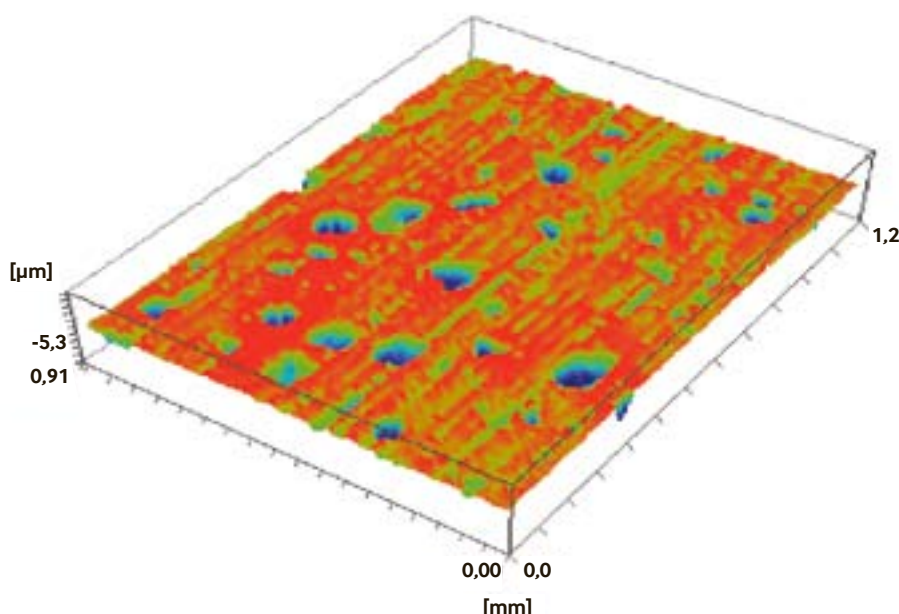


Bild 1: Beispiel einer typischen 3D-Probe auf einer durch Verunreinigungen eingedrückten Wälzlagelaufbahn

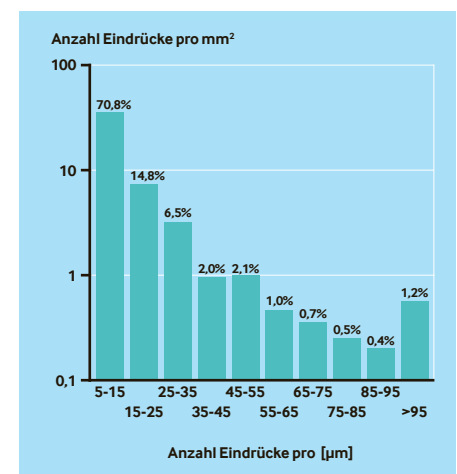


Bild 2: Beispiel einer Eindruckpopulationsstatistik, abgeleitet aus den 3D-Proben einer Wälzlagelaufbahn. Das Lager lief unter starker Verunreinigung, vergleichbar mit einem ISO 4406 Reinheitscode im Klassifizierungsbereich -/19/16 bis -/21/17

rechnung wird ein Maß für die Population der Eindrücke für unterschiedliche Partikelverunreinigungsgrade auf den Laufbahnen benötigt.

Die Reinheit eines gegebenen Öls und zugehöriger Betriebsbedingungen kann durch statistische Messungen, der auf den Lagerlaufbahnen gefundenen Eindruckpopulationen (siehe Bild 2), beschrieben werden. Die Auswertung der Spannungen, die sich aus verschiedenen Arten von Eindruckverteilungen ergeben, kann auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden. i) Durch Verwendung einer expliziten direkten Methode, beginnend mit 3D-Mapping von realen eingedrückten Zonen auf der Lagerlaufbahn (Bild 1) und weiter wie in Teil 1 [4] im Fall der Berechnung des Schmierungsbeiwertspannungsintegrals beschrieben; oder ii) implizit durch Berechnung des Spannungsintegrals für unterschiedliche Eindruckgeometrien (Referenzeindrücke) und zugehörige Schmierungsbedingungen. Diese Basisdaten können dann zur Berechnung der realen Oberflächen durch korrektes Hinzufügen des durch Eindrücke modifizierten volumenbezogenen Spannungsintegrals verwendet werden. Dabei kann jeder spezifische Typ einer Eindruckpopulation, der in der eingedrückten Zone des Lagers gefunden wird, beschrieben werden. Die Anwendung dieser Methode verlangt ein automatisches Zählen und Kategorisieren der Eindruckpopulation von 3D-Oberflächenproben der Lagerlaufbahn. Dazu wird ein im Hause entwickeltes Eindruck-Zähl-und-Klassifizierungssystem angewandt. Damit können unterschiedliche Eindruckmuster in Lageranwendungen charakterisiert und somit Eindruckpopulationen für verschiedene Betriebsbedingungen im Lager beschrieben werden (Bild 2).

Lager, die unter ähnlichen Bedingungen laufen, können trotzdem signifikante Abweichungen in ihrem Eindruckmuster und der sich ergebenden Eindruckpopulation aufzeigen. Das kann aufgrund von unterschiedlichen örtlichen Ölfüssen oder geometrischen Abweichungen im Lager selbst erklärt werden. Trotz dieser Unterschiede

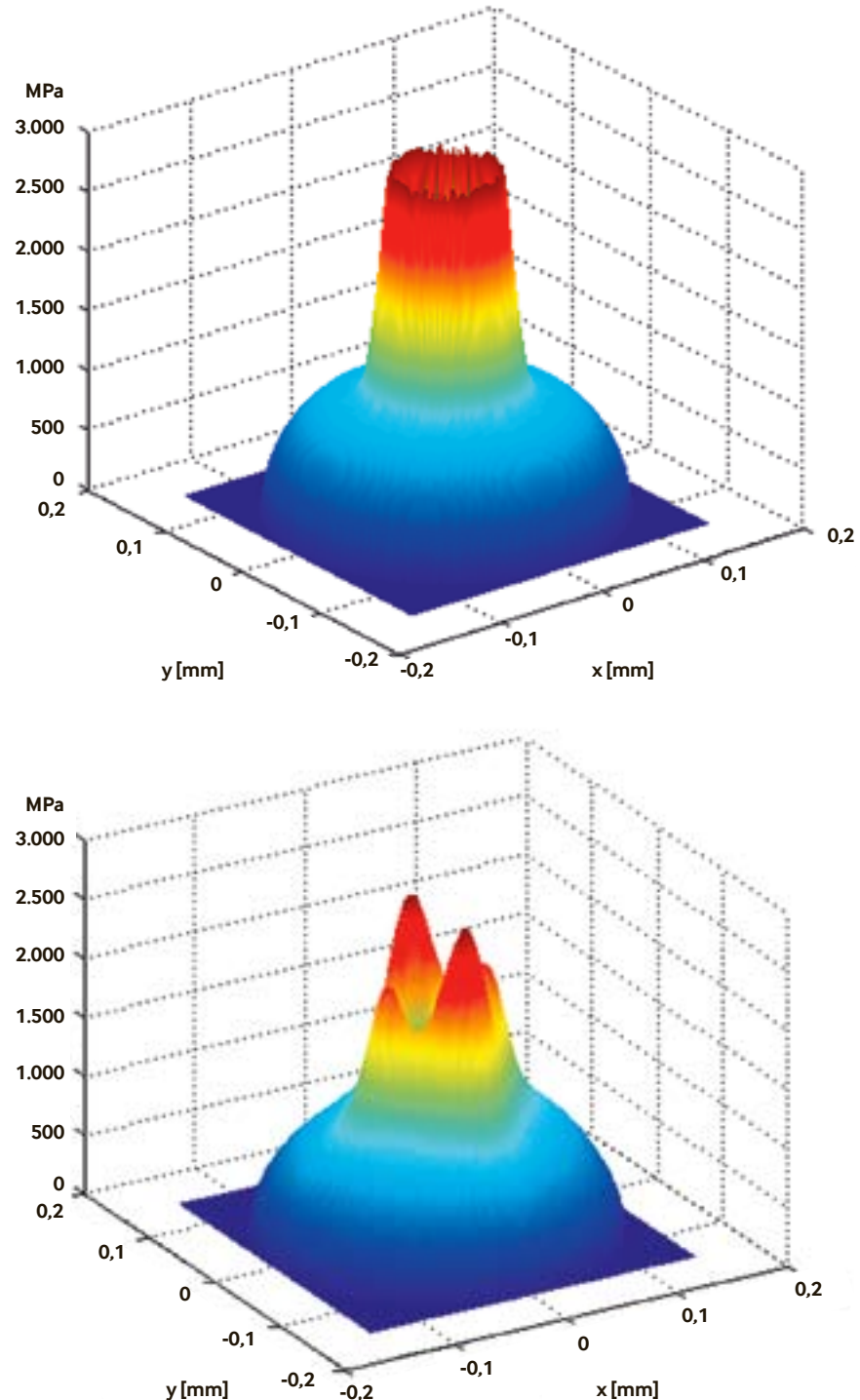


Bild 3: Beispiel einer Kontaktdruckberechnung eines typischen Eindrucks (150 µm Durchmesser, 5 µm Tiefe) unter trockenen und geschmierten Bedingungen. Links: Kontaktdruck „trocken“ (kein Schmierfilm). Rechts: derselbe Eindruck zeigt die durch einen 0,3 µm Ölfilm im Wälzkontakt hervorgerufene Abschwächung der Kontaktspannung. In beiden Fällen beträgt der nominelle Hertzsche Druck $P_0 = 1,255 \text{ GPa}$

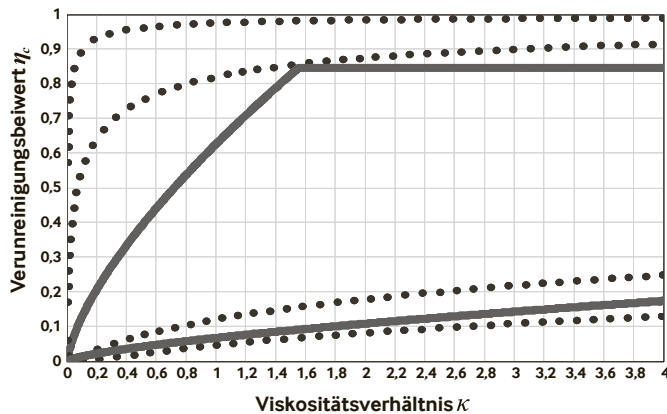


Bild 4a: Vergleich des numerisch abgeleiteten Verunreinigungsbeiwertes (punktierte Linie) und dem nach Gleichung 11 errechneten Verunreinigungsbeiwert (durchgezogene Linie). Lager mit mittlerem Durchmesser $d_m=50$ mm, geschmiert mit hochsauberem Öl (ISO 4406 Code -/13/10; obere Kurven) und unter stark verunreinigten Bedingungen (ISO 4406 Code -/19/16; untere Kurven)

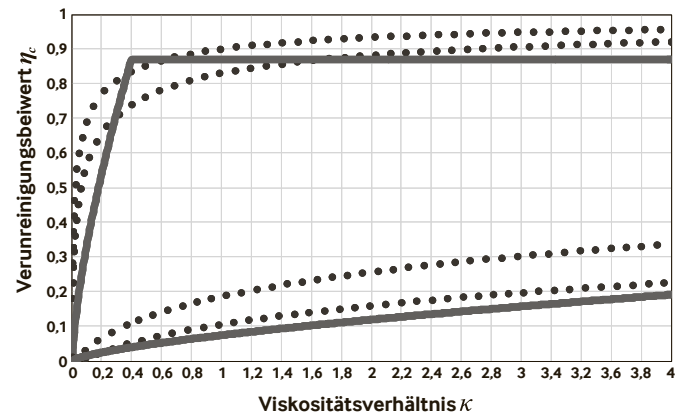


Bild 4b: Vergleich des numerisch abgeleiteten Verunreinigungsbeiwertes (punktierte Linie) und dem nach Gleichung 11 erlangten Verunreinigungsbeiwert (durchgezogene Linie). Lager mit mittlerem Durchmesser $d_m=2.000$ mm und Ölinheitsgrad ISO 4406 -/15/12 (obere Kurven) und mittlerem Durchmesser $d_m=25$ mm und Ölinheitsgrad ISO 4406 -/17/14 (untere Kurven)

ist es ersichtlich, ob ein Lager unter starker Verunreinigung oder unter sehr sauberen Bedingungen lief.

Die entsprechende Sauberkeit wird durch einfache Reinheitsklassen beschrieben. Durch diese Methode kann man innerhalb eines gegebenen Bereiches dem Schmierstoff eine entsprechende Reinheitsbeurteilung zuordnen.

Für die Verwendung der obigen Methodologie wurde das vergrößerte volumenbezogene Spannungintegral für verschiedene Referenzeindruckgeometrien berechnet. Diese Berechnung wurde dahingehend er-

weitert den Einfluss der Ölfilmdicke auf die entstehenden Spannungsüberhöhungen (an den Eindrücken) zu berücksichtigen (Schmierungsbedingungen, siehe Teil 1 [4]).

Dies ist ein entschiedener Vorteil des vorliegenden Modells, dass die Auswirkungen des lokalen Ölfilms im Rahmen der Bewertung des Verunreinigungsbeiwertes ausdrücklich berücksichtigt werden. Der durch den Schmierfilm verursachte Spannungsverminderungseffekt ist, wie im Rechenbeispiel von Bild 3 gezeigt, signifikant und muss somit berücksichtigt werden. Auf diese Wei-

se kann man den auf den Schmierfilm bezogenen globalen Einfluss der Oberflächenrauheit loskoppeln, und somit auch eine Bewertung des Verunreinigungsbeiwertes in Gleichung (10) mit $\eta_b = 1$ vornehmen.

Wie in Bild 3 dargestellt, wird die Größe und Verteilung des Spannungsanstiegs am Eindruck durch den im Wälzkontakt anwesenden Schmierfilm stark beeinflusst. Große Filmdicken reduzieren (dämpfen) die resultierenden Kontaktspannungen und verändern deren Verteilung, während sehr kleine Filmdicken zu hohen Spannungskonzentrationen führen.

Lagertype	Bezeichnung	Last – C/P	Schmierung –K
Rillenkugellager	6305, 6205, 6206, 6207, 6309, 6220	1 2,8 2,4 2,1 3,1 3,5 4 6	4 3,4 2,1 2 1
Zylinderrollenlager	NU 207 E, NU 309 E	2,5 2,77 2,82	4 1 0,8
Pendelrollenlager	22220 E, 22220 CC	2,2 2,3 2,5 2,3 2,7 3 4,7	4 3,6 1,8 0,37 0,28
Kegelrollenlager	331274, K-LM11749/10, K-HM89449/10, K-580/572	1 1,1 1,3 2,5 3,5	4 2,9 0,9

Tabelle 1.
Zusammenfassung
der Prüfbedingungen

Um diesen Effekt mit einzuschließen, wurde, in Übereinstimmung mit den numerisch errechneten Ergebnissen aus [6], [7], [8] und [9], in der parametrischen Auswertung der Kontaktdruckverteilung eine auf den Schmierfilm bezogene Reduzierung (Dämpfung) der Spannungen berechnet. D.h. die Reduzierung der Spannungsspitzen ist abhängig vom Viskositätsverhältnis κ . Es gilt die Annahme, dass sich die erwartete Durchschnittsfilmdicke im Wälzkontakt proportional zum Viskositätsverhältnis verhält. Es sei angemerkt, dass Schwankungen in den Lagerabmessungen ebenfalls einen Einfluss auf das Lebensdauerverhältnis in Gleichung (9) und η_c in Gleichung (10) haben. Große Lager werden ein großes und glattes (homogenes) Spannungintegral haben, das gegenüber dem eindruckbezogenen Spannungintegral dominiert.

Ferner besitzt die maximale eindruckbezogene Spannungskonzentration einen natürlichen oberen Grenzwert aufgrund der maximalen Partikelgröße, die in einem Flüssigkeitsstrom noch transportiert werden kann; so wird sie nicht von der Lagergröße abhängen, sondern nur von dem Reinheitsgrad des Schmierstoffes. Daher haben groß dimensionierte Lager verglichen mit klein dimensionierten Lagern einen Vorteil in Bezug auf Empfindlichkeit gegenüber dem Einfluss von Verunreinigungen.

2. VERUNREINIGUNGSBEIWERT IN DER PRAXIS

Wie zuvor diskutiert, liefert die numerische Lösung der Gleichung (10) eine theoretische Grundlage für die Beurteilung des Verunreinigungsbeiwerts η_c . Es erlaubt die parametrische Bewertung des Beiwerts für verschiedene Grade der Partikelverunreinigung und Schmierungsbedingungen von Lagern unterschiedlicher Größe.

Ergebnisse dieser Analyse können mit dem η_c Modell und entsprechenden Diagrammen und Tabellen in [1] und [2] verglichen werden. In [2] wird der Verunreinigungsbeiwert η_c als Funktion von κ für verschiedene mittlere Durchmesserwerte

d_m bereitgestellt. Für einige Reinheitsklassifizierungen des Schmierstoffes werden Diagramme angegeben. Grundsätzlich kann das vereinfachte Modell von η_c durch folgende Basisgleichung [2] beschrieben werden:

$$\eta_c(\kappa, d)_{\beta_{cc}} = \min \left(c_1 (\beta_{cc}) \kappa^{0.68} d_m^{0.55}, 1 \right) \cdot \left[1 - \left(c_2 (\beta_{cc}) d_m^{-1/3} \right) \right] \quad (11)$$

wobei c_1 und c_2 Konstanten gemäß der Ölrreinheitsklassifizierung sind. Diese Klassifizierung basiert auf der ISO 4406 Reinheitseinteilung (oder einer entsprechenden Filterqualitätsstufe d. h. ISO 16899) [2]. Im Unterschied zu dem η_b Modell hängt η_c von drei Parametern ab; der Vergleich zwischen den numerisch geschätzten Werten von η_c nach Gleichung (10) und den aus Gleichung (11) erlangten η_c Werten ist komplex. Zur Vereinfachung des Vergleichs werden zwei getrennte Fälle, die sich auf Ölumlaufschmierung mit Filter beziehen, betrachtet. Die Ergebnisse dieses Vergleichs werden in den Bildern 4a und 4b gezeigt.

- Fall i) der Lagerdurchmesser wird konstant gehalten und zwei sehr unterschiedliche Reinheitsklassen bewertet; mit Ölumlaufschmierung und Filtersystem (Bild 4a).
- Fall ii) der Lagerdurchmesser variiert zwischen zwei sehr unterschiedlichen Größen und ein dazwischenliegender Verunreinigungsgrad wird bewertet; mit Ölumlaufschmierung und Filtersystem (Bild 4b).

Ein Vergleich der funktionellen Abhängigkeit von η_c vom Viskositätsverhältnis κ ergibt:

i) für hohe κ Werte zeigt das vereinfachte Modell (11) (durchgezogene Linie in den Bildern 4a und 4b) eine gute Übereinstimmung mit dem numerischen η_c Wert (punktierte Linie), während

ii) für niedrige κ Werte das vereinfachte Modell (11) in einigen Fällen sehr konservativ bewertet wird.

Im niedrigen κ Gebiet weist das numerische Modell tatsächlich eine größere Varianz auf, da es auf einer einfachen nominellen Filmdicke basiert, während der Fehlermechanismus hauptsächlich ein lokales Ereignis ist. Das vereinfachte Modell (11) ist somit eine konservative Methode. Somit ist Gleichung (11) ein sinnvolles Ingenieursmodell für die Abschätzung des Verunreinigungsbeiwerts, wie er für die Lagerlebensdauerberechnung verwendet wird.

3. VERSUCHSERGEBNISSE

Lebensdauerversuche an Lagern, die vordefinierten Verunreinigungsbedingungen unterworfen werden, sind sehr komplex [10]. Besondere Schwierigkeiten bereitet es in einer Versuchsumgebung bestimmte Überrollungs-eindrucksmuster und Eindruckschäden zu simulieren, wie sie in einer Standardindustrieanwendung (z. B. im Getriebe) zu finden sind (und durch eine gegebene ISO 4406 Reinheitsklassifizierung des Öls charakterisiert werden). So kann in einer Versuchsanordnung der Schmierstoffbehälter viel größer (Faktor >100) sein als in einer normalen Lageranwendung. Ferner kann die Art, wie das Öl durch das Lager transportiert wird, sich signifikant von dem was in einer realen Lageranwendung geschieht unterscheiden. Daher muss beim Festlegen der Prüfbedingungen die tatsächliche Gesamtanzahl der Partikel, die das Prüflager erreicht, als Verunreinigungsreferenz bewertet werden. Dies ist erforderlich, um exzessive Schäden durch Eindrücken zu vermeiden, was sonst zu falschen Interpretationen von typischen Wälzlageranwendungen führen würde. Der Verunreinigungsgrad ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen den ursprünglich im System vorhandenen Fremdstoffen und den Partikeln, die im umlaufenden Öl erzeugt und entfernt werden.

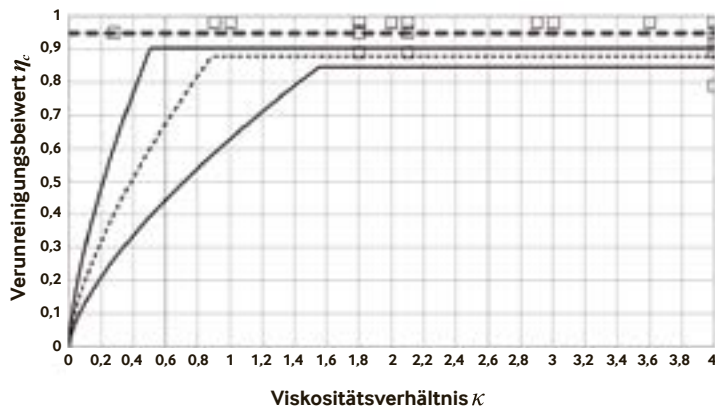


Bild 5a: Lebensdauerversuche unter sauberen Bedingungen (vergleichbar mit einem ISO 4406 Code -/13/10; -/14/11). Vergleich des aus Lebensdauerversuchen erhaltenen Verunreinigungsbeiwerts η_c (siehe Kästchen) und den zugehörigen η_c Kurven (durchgezogene Linien) nach Gleichung (11). Lager mit mittlerem Durchmesser $d_m = 50-200$ mm (untere und obere Kurven). Die dicke gestrichelte Linie ist die Trendlinie (Ausgleichskurve aus den experimentellen Datenpunkten)

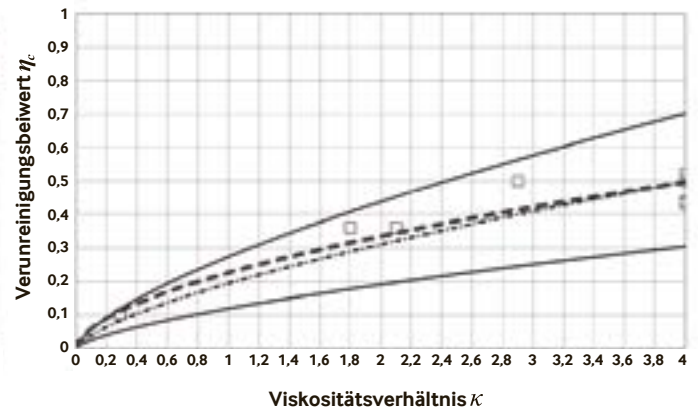


Bild 5b: Lebensdauerversuche an Lagern mit Filterdichtungen (leichte Verunreinigung: ISO 4406 -15/12; -/16/13). Vergleich des aus Lebensdauerversuchen erhaltenen Verunreinigungsbeiwerts η_c (siehe Kästchen) und den zugehörigen η_c Kurven (durchgezogene Linien) nach Gleichung (11). Lager mit mittlerem Durchmesser $d_m = 30-100$ mm (untere und obere Kurven). Die strichpunktierte Linie gilt für Lager mit mittlerem Durchmesser $d_m = 60$ mm. Die dicke gestrichelte Linie ist die Trendlinie (Ausgleichskurve aus den experimentellen Datenpunkten)

Diese Schwierigkeiten verhinderten unter anderem bei früheren Versuchen, dass rein experimentelle Methoden bei der Entwicklung eines Verunreinigungsbeiwerts für die Lebensdauerberechnung übernommen werden konnten.

Dennoch wurden in der Vergangenheit Lebensdauerversuche unter unterschiedlichen Schmier- und Verunreinigungsbedingungen durchgeführt. Eine beträchtliche Anzahl von Versuchsergebnissen ist somit zugänglich [10]. D.h. das Verunreinigungsbeiwertmodell (11) kann durch diese Lebensdauerversuche überprüft werden. Die hier berichteten Versuchsergebnisse beziehen sich auf Proben aus 172 Lagerpopulationen, die in den letzten Jahren untersucht wurden. Jede Prüfreihe besteht durchschnittlich aus einer Gruppe von 30 Lagern. Somit werden experimentelle Ergebnisse von mehreren tausend Lebensdauerversuchen herangezogen. In Tabelle 1 sind einige relevante Informationen, betreffend Lagertypen und Prüfbedingungen, zusammengefasst. Als Prüflager wurden hauptsächlich kleine bis mittlere Größen verwendet. Geschmiert wurden die Lager durch Turboöl in hauptsächlich drei ISO-Viskositätsklassen VG 9, VG 32 und VG 68. Die Versuche wurden mit verschiedenen Drehzahlen durchgeführt, von 1000 bis 6000 U/min, und so gewählt, dass die

Außenringtemperatur innerhalb der geforderten Versuchsgrenzwerte lag.

Die Auswertung des Verunreinigungsbeiwerts basiert, unter Anwendung eines Rückrechnungsverfahrens, auf dem direkten Vergleich des Beiwerts der aus den Median-Versuchslebensdauer L_{10} -Werten abgeleitet wurden. Die experimentell abgeleiteten Verunreinigungsbeiwerte wurden anschließend mit dem vereinfachten Modell von η_c nach Gleichung (11) verglichen (siehe Bilder 5a, 5b und 5c).

Grundsätzlich können die in den Lebensdauertests vorhandenen Reinheitsbedingungen in drei Klassen unterteilt werden:

- Versuche mit Standardreinheit, Bild 5a. Diese Versuche werden mit guter Ölfilterung unter Anwendung eines hocheffizienten Multi-Pass Filtersystems $\beta_{x(c)} = 3$ (oder besser) durchgeführt. Mit diesem Filter können Reinheitscodes ISO 4406: -/13/10 bis -/14/11 erreicht werden. Der zu erwartende η_c Beiwert, der sich bei diesem Testtyp ergibt, liegt bei vollem Schmierfilm zwischen 0,8 und 1.
- Lagertests mit Dichtung, Bild 5b. Lebensdauerversuche mit vorkontaminiertem Öl mit einer festgelegten Menge harter (750 HV) metallischer Partikel. Die Verunreinigungspartikel liegen in einer Normalverteilung in der Größenordnung zwi-

schen 25 und 50 μm vor. Das Öl umspült das mit Gummidichtungen ausgerüstete Versuchslager. Die Lagerdichtungen haben die Funktion eines Filters und nur eine geringe Partikelmenge kleiner Größe kann die Dichtungen durchdringen und damit das Lager zu kontaminieren. Diese Art der Versuche kann als leicht verunreinigt eingestuft werden (Ölbad ISO 4406 Code: -/15/12 bis -/16/13). Unter den gegebenen Prüfbedingungen kann der zu erwartende η_c Beiwert bei diesem Versuchstyp zwischen 0,3 und 0,5 liegen.

- Vorkontaminierte Versuche, Bild 5c. Der Versuch beginnt mit einem 30-minütigen Einlaufen in einem Ölumlaufschmiersystem, das mit einer festgelegten Menge harter (~ 750 HV) metallischer Partikel (Größenverteilung 25 bis 50 μm) verunreinigt ist. Nach dem Einlauf unter kontaminierten Bedingungen wird das Lager unter sauberen Standardbedingungen weiter geprüft. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine gute und effiziente Reproduzierbarkeit von Eindrucksprofilen, d. h. die Erzeugung vordefinierter Eindrücke auf den Lagerlaufbahnen. Unter den gegebenen Prüfbedingungen wird dieser Testtyp als typisch stark verunreinigt beurteilt (Ölbad ISO 4406 Code: -/17/14 bis -/19/15). Der zu erwartende η_c Wert für diesen Lebensdauerversuchstyp kann zwischen 0,01 und 0,3 liegen.

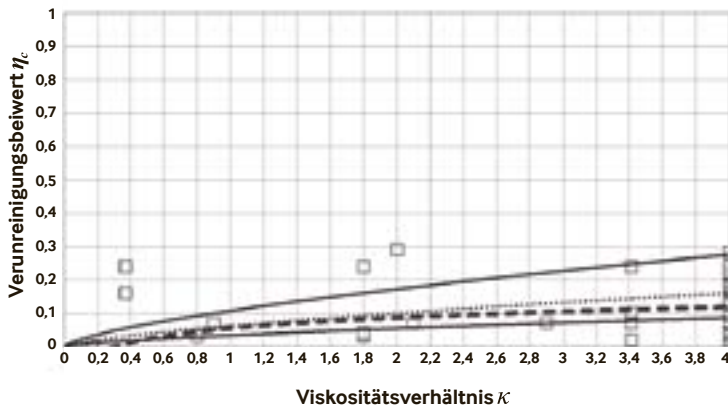


Bild 5c: Lebensdauerergebnisse an vorkontaminierten eingelaufenen Lagern (Bedingungen entsprechend einer typischen bis starken Verunreinigung vergleichbar mit ISO 4406 -/17/14 bis -/19/15). Vergleich des aus Lebensdauerversuchen erhaltenen Verunreinigungsbeiwerts η_c (siehe Kästchen) und den zugehörigen η_c Kurven (durchgezogene Linien) nach Gleichung (11). Lager mit mittlerem Durchmesser $d_m = 25-100$ mm (untere und obere Kurven). Die dicke gestrichelte Linie ist die Trendlinie (Ausgleichskurve aus den experimentellen Datenpunkten). Die dünne punktierte Linie (gerade oberhalb der Trendlinie) ist die zugehörige Kurve nach Gleichung (11)

Aus den Bildern 5a, 5b und 5c ist ersichtlich, dass die Anzahl der experimentellen Datenpunkte begrenzt ist. Für den Vergleich mit dem vereinfachten Modell η_c Gleichung (11) kann kein klarer Trend aufgezeigt werden. Dennoch gibt es eine ziemlich gute Übereinstimmung zwischen den Durchschnittswerten der Punkte, bezogen auf die drei verschiedenen Reinheitsklassifizierungen und dem Verunreinigungsbeiwert η_c , der unter Verwendung des vereinfachten Modells Gleichung (11) erzielt wird. Tatsächlich zeigt die aus den experimentellen Datenpunkten gebildete Trendlinie für alle drei untersuchten Fälle eine gute Übereinstimmung mit der zugehörigen η_c Kurve. Es ist ebenfalls deutlich, dass eine detaillierte Auswertung, die nur auf experimentellen Daten basiert, aufgrund der inhärenten Streuung in den Lebensdauerergebnissen schwierig ist. Der theoretische Rückhalt, der bei der Lösung der Gleichung (10) geboten wird, ist also für die Entwicklung des vereinfachten Modells η_c Gleichung (11) essenziell.

4. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Basismethodologie für die Ableitung des Schmierungsbeiwerts η_b und des Verunreinigungsbeiwerts η_c , die zur Berechnung der Lebensdauer dienen, wird vorgestellt. Es wird aufgezeigt, dass die Mikro-EHD-

Basistheorie zur Auswertung beider Beiwerte herangezogen werden kann. Die Theorie basiert auf der Anwendung von Mikro-EHD-Drücken und der parametrischen Auswertung des Ioannides-Harris Volumenspannungsintegrals, bezogen auf glatte/eingedrückte Bedingungen an realen Lageroberflächen. Die Auswertung des volumenbezogenen Ermüdungsspannungsintegrals basiert auf einer numerischen FFT-Rechenmethode zur Ermittlung der an der Oberfläche und unterhalb der Oberfläche liegenden Spannungen im Wälzkontakt.

Diese Methode eignet sich besonders zur Evaluierung verschiedenster Belastungen und Spannungsfelder die z.B. während des Überrollens von Verunreinigungen im Lager entstehen. Ein wichtiges Merkmal der Wälzkontaktspannungsberechnung ist die Einbeziehung der Auswirkung des Schmierfilms auf die Oberflächenrauheiten während des Überrollens. Im Fall von sich verändernden Schmierungsbedingungen im Wälzkontakt führt dies zu einer realistischeren Prognose des unter der Oberfläche liegenden Spannungsfeldes. Durch Anwendung der oben beschriebenen Berechnungsmethode wird eine Auswertung der in den Lagernormen angewendeten Gleichungen für die Bewertung des Schmierungs- und Verunreinigungsbeiwerts durchgeführt. Die folgenden Schlüsse können gezogen werden:

1. Wie in den Gleichungen (4) und (10) verdeutlicht, ist der prognostizierte Effekt der Verunreinigung auf die Lagerlebensdauer lastabhängig. Dies stimmt mit allgemeinen Erfahrungswerten überein und unterscheidet sich von anderen Modellen aus der freien Literatur. Ein Vergleich zwischen dem vorliegenden Modell und den Lagerlebensdauerversuchen in den Bildern 5a, 5b und 5c bestätigt dies.

2. Die Basistheorie um den Schmierungsbeiwert η_b sowie den Verunreinigungsbeiwert η_c zeigt deutlich, dass sowohl die Schmierfilmbedingungen als auch die Reinheitsbedingungen des Schmierstoffs signifikanten Einfluss auf die Betriebsbedingungen des Lagers haben. Die korrekte Charakterisierung dieser Beiwerte ist für eine realistische Vorhersage der Lebenserwartung von Wälzlager essenziell. ■

Von Antonio Gabelli, Guillermo Morales-Espejel und Stathis Ioannides, SKF Engineering Research Centre, Nieuwegein, Niederlande

Literaturangaben

- [1] Ioannides, E., Bergling, G., Gabelli, A., *An Analytical Formulation for the Life Rating of Rolling Bearings*, Acta Polytechnica Scandinavica, Mech. Eng. Series, 137, 1999.
- [2] International Standard: *Rolling Bearings – Dynamic load rating and rating life*, ISO 281: 2007.
- [3] Gabelli, A., Morales-Espejel, G.E., Ioannides, E., *Particle Damage in Hertzian Contacts and Life Ratings of Rolling Bearings*, Tribol. Trans., vol. 51, pp. 428–445, 2008.
- [4] Morales-Espejel G.E., A. Gabelli, Ioannides E., *Auswirkungen von Schmierung und Verunreinigungen auf die Lagerlebensdauer, Teil 1 – SKF Evolution #2-2010*.
- [5] Ioannides, E., and Harris, T.A., *A New Fatigue Life Model for Rolling Bearings*, Trans. ASME, J. of Trib., 107, pp. 367–378, 1985.
- [6] Morales-Espejel, G.E., Lugt, P.M., Van Kuilenburg, J., Tripp, J.H., *Effects of Surface Micro-Geometry on the Pressures and Internal Stresses of Pure Rolling EHL Contacts*, STLE Tribology Transaction Vol. 46, pp. 260–272, 2003.
- [7] Tripp, J.H., Van Kuilenburg J., Morales-Espejel G.E., Lugt, P.M., *Frequency Response Functions and Rough Surface Stress Analysis*, STLE Tribology Transaction Vol. 46, pp. 376–382, 2003.
- [8] Venner, C.H., and Lubrecht, A.A., *Multi-Level Methods in Lubrication*, Elsevier Science, 2000.
- [9] Greenwood, J.A., and Morales-Espejel, G.E., *The Behaviour of Transverse Roughness in EHL Contacts*, Proc. Instn. Mech. Engrs., part J, J. of Eng. Tribol., 208, pp. 121–132, 1994.
- [10] Gabelli A., Kerrigan A.M., de Blic E., *HN treated rolling bearings for extended service life in: Progress in Heat Treatment and Surface Engineering, Proceedings of the fifth ASM Heat Treatment Conference*, Mittermeijer, E.J. and Grosch, J., Ed., June 2000, Gothenburg, Sweden.